

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique

Département d'électrotechnique

Mémoire de Magister en électrotechnique

Option : Entraînements électriques

Présenté par :

**TALAH Djamila**

**Thème**

**Etude du système de commande automatique appliqué à  
l'entraînement électrique d'une station de pompage**

Devant le jury composé de :

NEDJAR Mohammed	Professeur	Université de Tizi-Ouzou,	Président
MAIDI Ahmed	Maître de conférences A,	Université de Tizi-Ouzou,	Rapporteur
CHAIBI Rachid	Professeur,	Université de Tizi-Ouzou,	Examineur
KOUADRI Abdelmalek	Maître de conférences A,	Université de Boumerdes,	Examineur
SADAOUI Youcef	Maître de conférences A,	Université de Tizi-Ouzou,	Examineur

Soutenu le :



## ***Remerciements***

Je tiens, tout d'abord, à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers Monsieur **R. CHAIBI**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), directeur du laboratoire de génie électrique (LGE), d'avoir proposé et dirigé ce travail. Je le remercie pour son aide, ses conseils et pour le temps qu'il a consacré pour le suivi de ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur **A. MAIDI**, Maître de conférences (A) à l'UMMTO, d'avoir accepté d'être le Directeur de ce mémoire.

Je remercie Monsieur **M. NEDJAR**, Professeur à l'UMMTO, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance. Je remercie également Monsieur **A. KOUADRI**, Maître de conférences (A) à l'Université de Boumerdes, et Monsieur **Y. SADAOUI** Maître de conférences (A) à l'UMMTO, d'avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie également tout les enseignants du département d'Electrotechnique, en particulier Monsieur **S. REZGUI** pour ses orientations et ses conseils précieux. Je tiens à remercier également Monsieur **A. DICHE** et Monsieur **F. NAMANI** pour leurs encouragements.

Je n'oublie pas de remercier le personnel de l'Unité d'Algérienne Des Eaux (ADE) de Tizi-Ouzou, pour leur accueil et la documentation qu'ils ont met à ma disposition. En particulier M<sup>me</sup> **F. GOUDJIL** et M<sup>r</sup> **TALI**.

Je remercie tout particulièrement M<sup>elle</sup> **HAMOUIMECHE Kaissa**, doctorante en Electrotechnique, ingénieur à l'Unité d'ADE d'AZAZGA, pour ses conseils, ses encouragements et son aide.

Je remercie également les post-graduant d'Entraînement électrique dont j'ai partagé l'amitié en particulier *Kahina, Fazia, Zoulikha, Nadia, Farida, Nassima, Oualid, Hassen et Djamel*.

En fin, j'exprime mes sincères remerciements à mes parents et mes frères pour leur soutien et leurs encouragements le long de mon cursus.

## **Résumé**

Le travail présenté dans ce mémoire étant l'étude du système de commande automatique appliqué à l'entraînement électrique d'une station de pompage d'eau chaude. Ce système est constitué, principalement, d'un variateur de fréquence et d'un moteur asynchrone accouplé à une pompe centrifuge. L'entraînement à vitesse variable d'un système de pompage d'eau permet de contrôler le débit et la hauteur manométrique de la pompe. Afin de pouvoir régler la vitesse du moteur, un variateur de fréquence commandé par la loi « V/f constant » a été mis en place. Pour aboutir aux résultats escomptés, le moteur utilisé est choisi selon la gamme normalisée des puissances utilisées dans les stations de pompage d'eau. Un système de commande a été mise en œuvre en déterminant les paramètres principaux de chaque dispositif.

**Mots-clés:** Entraînement électrique, système de commande, station de pompage, pompe centrifuge.

## **Abstract**

The work presented, is a study of an automatic control system applied to the electric drive of a hot water pumping station. This system consists mainly of an inverter and an induction motor coupled to a centrifugal pump. The variable-speed drive of a system of water pumping permits to control the debit of the pump. In order to adjust the speed of the motor, an inverter controlled based on the law "V/f constant" is developed. To achieve the desired results, a motor is selected, according to standard power range used in water pumping stations, and a control system has been implemented by determining the key parameters of each device.

**Keywords:** Electric drive, automated control system, station of pumping, centrifugal pump.

## **Sommaire**

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
 <b>Chapitre I Analyse du processus technologique des stations de pompage d'eau chaude</b> 	
I-1-Introduction .....	3
I-2- Production de chaleur.....	3
I-3-Les installations de production d'eau chaude.....	5
I-4-Modes de production d'eau chaude.....	5
I-4-1-Directement.....	5
I-4-2-Indirectement .....	5
I-4-a-production instantanée.....	6
I-4-b-Production en accumulation.....	7
I-4-c-production semi-instantanée ou en semi-accumulation.....	7
I-5-Les appareils de production d'eau chaude.....	10
I-5-1-La chaudière .....	10
I-5-2-Echangeurs .....	11
I-5-3-Les ballons de production et stockage d'eau chaude.....	12
I-5-3-1-Ballons électrique.....	12
I-5-3-2-Ballons à accumulation .....	12
I-5-3-3-Raccordement des ballons.....	13
I-5-4-Le vase d'expansion sanitaire.....	14
I-6-La température de l'eau chaude sanitaire.....	14
I-7-Réseau de distribution d'eau chaude.....	15
I-8-Éléments constitutifs d'une station de pompage .....	15
I-8-1-Les pompes.....	15
I-8-1-1- La pompe volumétrique .....	16
I-8-1-2-Les pompes centrifuges .....	16
I-8-1-2-1-Fonctionnement d'une pompe centrifuge .....	17
I-8-1-2-2-Les caractéristiques de la pompe .....	17
I-8-1-3-Le point de fonctionnement d'une pompe.....	18
I-8-1-4-Fonctionnement des pompes en série et en parallèle.....	18
I-8-1-5-Différents types de pompes centrifuges .....	19
I-8-1-6-Technologie des pompes centrifuge.....	19
I-8-1-7- Matériaux constitutifs des pompes .....	19

I-8-1-8-Température limite.....	20
I-8-2-Circulateurs d'eau chaude (Pompes de circulation).....	20
I-8-3-Le groupe électropompe .....	21
I-8-4-Les moteurs d'entraînement .....	22
I-8-5-Équipement électrique .....	23
I-8-6-Système de commande et de contrôle.....	23
I-8-6-1-Armoire de commande.....	23
I-8-6-2-Contrôle.....	24
I-8-6-3-Les automates programmables industriels .....	25
I-9-Conclusion .....	25
<b>Chapitre II Choix de système d'entraînement et d'automatisation</b>	
II-1-Introduction.....	26
II-2-Calcul des charges des mécanismes .....	26
II-2-1-Couple de charge .....	26
II-2-2- L'équation de mouvement du système d'entraînement.....	26
II-2-2-1-Cas d'un accouplement élastique .....	27
II-2-2-2-Cas d'un accouplement rigide .....	28
II-2-3-Calcul du couple résistant.....	29
II-3-Calcul préliminaire de la puissance du moteur.....	29
II-3-1-Construction du diagramme de charge et précision de la puissance du moteur.....	30
II-3-1-1-Diagramme de vitesse de la pompe .....	31
II-3-1-2-Diagramme de couple de la pompe .....	33
II-3-1-3-Diagramme de vitesse du moteur .....	33
II-3-1-4-Diagramme de couple du moteur .....	34
II-4-Contrôle du moteur en capacité de surcharge et d'échauffement .....	35
II-5-Description des différents types de moteurs, utilisés dans les stations de pompage d'eau chaude.....	36
II-5-1-Problème d'échauffement .....	38
II-6-Calcul des paramètres du schéma équivalent et construction de la caractéristique mécanique naturelle.....	39
II-6-1-Calcul des paramètres du schéma équivalent .....	39

II-6-1-1-Le courant rotorique .....	40
II-6-1-2-Bilant de puissances .....	40
II-6-1-3-Le couple électromagnétique.....	41
II-6-1-4-Le courant nominal.....	42
II-6-2- Caractéristique mécanique naturelle du moteur asynchrone.....	43
II-6-2-1- Caractéristique du couple en fonction de glissement.....	44
II-6-2-2 Caractéristique du moteur dans les deux régimes de fonctionnement	45
II-6-2-3- Caractéristique du groupe électropompe.....	45
II-7- Conclusion .....	48
 <b>Chapitre III Modélisation et commande du moteur asynchrone à cage</b>	
III-1- Introduction .....	49
III-2- Présentation de la machine.....	49
III-3- Modélisation du moteur asynchrone a cage .....	49
III-3-1- Equations électriques .....	50
III-3-2- Equations magnétiques .....	50
III-3-3- Equation mécanique .....	51
III-3-4- Transformation de Park – référentiel (d,q).....	51
III-3-5- Equations électriques dans le référentiel (d,q) .....	52
III-3-5-1- Equations des flux .....	53
III-3-5-2- L'équation du couple électromagnétique .....	53
III-3-6- Modèles d'état de la machine asynchrone .....	53
III-4- Résultats de simulation de la machine asynchrone couplée directement au réseau.	54
III-4-1- Résultats de simulation au démarrage à vide et en charge.....	54
III-5- Modélisation de l'alimentation du moteur asynchrone.....	56
III-5-1- Les stratégies de commande des onduleurs .....	58
III-5-1-1- Technique de la modulation de largeur d'impulsions .....	59
III-6- Différentes stratégies de commande de la machine asynchrone .....	60
III-6-1- Commande vectorielle par orientation de flux.....	61
III-6-2- Commande directe de couple (DTC).....	61
III-6-3- Commande scalaire .....	62
III-6-3-1- Différentes lois de commande scalaire.....	63
III-6-3-1-1- Alimentation en tension .....	64
III-6-3-1-1- Commande scalaire avec contrôle de la fréquence statorique.	65

III-6-3-1-2-Commande scalaire avec contrôle de la fréquence rotorique.....	66
III-6-3-2-Alimentation en courant .....	67
III-7-Conclusion .....	69
<b>Chapitre IV Elaboration du schéma de puissance et Analyse des caractéristiques dynamiques de l'installation</b>	
IV-1-Introduction .....	70
IV-2-Détermination des paramètres principaux et élaboration du système de commande	70
IV-2-1-Elaboration du schéma de puissance de l'entraînement électrique automatisé.....	70
IV-2-2-Calcul des paramètres du variateur de fréquence .....	72
IV-2-3-Calcul de l'inductance du filtre L1 .....	73
IV-2-4-Calcul de l'inductance du filtre L2 .....	73
IV-2-5-Elaboration du système de commande .....	74
IV-2-5-1-Principe de fonctionnement .....	75
IV-3-Loi de commande appliquée au variateur de fréquence .....	76
IV-4-Synthèse du régulateur de vitesse .....	78
IV-5-Analyse des caractéristiques dynamiques de l'installation de pompage .....	79
IV-5-1-Résultats de simulation du groupe électropompe alimenté directement par le réseau électrique.....	79
IV-5-2-Résultats de simulation du groupe électropompe associé au variateur de vitesse.....	82
IV-5-3-Résultats de simulation pour une vitesse de référence de 50% de la vitesse nominale.....	88
IV-6-Conclusion .....	94
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>95</b>

## **Liste des symboles**

$C_m$	couple moteur.
$C_T$	couple de torsion.
$K$	coefficient d'élasticité.
$J_1, J_2$	moment d'inertie de la première et de la deuxième masse.
$\varphi_1, \varphi_2$	position angulaire respective au deux masse
$\Omega_1, \Omega_2$	vitesse de rotation de la première et de la deuxième masse respectivement.
$f_1, f_2$	coefficient de frottement du moteur et de la pompe respectivement.
$C_{cr}$	le couple maximum
$C_p$	le couple de la pompe
$Kq$	coefficient de proportionnalité
$P_h$	puissance hydraulique de la pompe.
$P$	masse volumique de l'eau.
$H$	hauteur manométrique
$Q$	le débit
$U_{ph}$	la tension de phase nominale.
$\eta$	le rendement
$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$	pulsation électrique des courants rotorique (rd/s).
$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$	pulsation électrique des courants statorique, (rd/s).
$\Omega = \omega/p$	la vitesse angulaire de rotation du moteur.
$p$	nombre de paires de pôle.
$X_c$	réactance inductive du court circuit.
$R_s, R_r$	les résistances actives des enroulements statorique et rotorique de la machine asynchrone, respectivement.
$g = \frac{\omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$	le glissement
$\Omega_s, \Omega_r$	vitesse angulaire du champ statorique et du rotor, respectivement.
$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$	coefficient de dispersion.
$T_s$	constante du temps statorique
$T_r$	constante du temps rotorique.
$g_{cr}$	le glissement critique

---

$C_{em}$	couple électromagnétique ;
$J$	moment d'inertie équivalent.
$K_f$	coefficient de frottement
$A, b, c$	indices correspondants aux trois phases (a), (b), (c) ;
$R, s$	indice correspondant au rotor et au stator ;
$D, q$	indices correspondants aux axes magnétiques dans le repère de park ;
$A, \beta$	indices correspondants au référentiel lié au stator ;
$\Psi$	flux ;
$L_{ss}$	inductance statorique ;
$M_{sr}$	inductance mutuelle entre une phase de stator et une phase de rotor ;
$\Theta$	la position angulaire du rotor par rapport au stator ;
$\Omega$	vitesse de rotation mécanique du rotor ;
$C_r$	couple de charge ;
$U_0$	tension continue à l'entrée de l'onduleur ;

# **Introduction Générale**

Presque vingt pour cent (20%) de l'énergie mondiale est consacré au pompage dont une majorité est utilisée pour le pompage de l'eau. Les stations de pompage sont utilisées pour un transfert et une distribution d'eau potable, fiable et efficace, afin de garantir la disponibilité de cette ressource précieuse à la consommation propre de l'Homme, ainsi qu'à la production industrielle et agricole. Les besoins modernes des collectivités (résidences, hôtels, hôpitaux..) conduisent à utiliser l'eau chaude en quantité toujours croissante, non seulement pour les usages sanitaires mais aussi pour des travaux et des tâches domestiques.

Les défis de création de nouvelles infrastructures et de modernisation de celles existantes ne sont pas limités simplement à assurer une disponibilité de l'eau, mais aussi à garantir un développement durable en prenant en compte d'importants facteurs tels que : l'efficacité d'énergie, la productivité, la fiabilité et les coûts de cycle de vie.

Depuis longtemps les moteurs à courant continu sont utilisés pour la variation de vitesse, dans les systèmes de pompage, vu leur principal avantage d'être facilement commandables, grâce au découplage naturel du flux et du couple. Cependant, la présence du collecteur et des balais a été, toujours, un inconvénient. De plus, le système basé sur l'utilisation du moteur à courant continu ne permet pas le fonctionnement en secours; lorsque le redresseur est en panne, le groupe électropompe est arrêté et il en résulte des manques d'eau [1]. Face à ces problèmes, le moteur asynchrone était la solution. Ce dernier, s'est imposé comme le moteur de premier choix dans les applications industrielles, notamment les stations de pompage d'eau, grâce aux nombreux avantages qu'il procure par rapport aux autres types de moteurs électriques.

Le développement des systèmes utilisant les moteurs asynchrones, fonctionnant à vitesse variable, a été possible grâce à la facilité d'implantation de techniques évoluées en temps réel dans des cartes de commande d'une part, et à la performance des convertisseurs statiques de puissance associés aux systèmes de contrôle d'une autre part.

La technologie de conversion de l'énergie continu-alternatif, en utilisant les convertisseurs statiques tel que les onduleurs de tension, constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance en pleine croissance. Cependant, le développement des variateurs de vitesse à courant alternatif résulte, en partie, de la volonté d'obtenir les niveaux de performances très élevés des moteurs à courant continu (en termes de temps de réponse en régulation de couple et de précision en régulation de vitesse) avec des moteurs à courant alternatif réputés pour leur robustesse, leur coût plus abordable et leur simplicité de maintenance.

Il existe un grand nombre de stratégies de pilotage de la machine asynchrone, toutes poursuivant l'idée de faire produire à la machine le couple le plus élevé possible, voisin du couple nominal, quelle que soit la vitesse, notamment aux basses vitesses et aux hautes vitesses. Pour ce faire, il faut alors non seulement agir sur la fréquence d'alimentation, mais aussi et surtout sur l'amplitude de la tension appliquée aux bornes du stator [2]. La commande scalaire reste cependant la plus répandue dans les applications industrielles notamment les stations de pompage d'eau. Cette stratégie de commande est assez développée dans la littérature [3-6]. Toutefois, plusieurs commandes scalaires existent selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension. Elles dépendent surtout de la topologie du convertisseur utilisé (onduleur de tension ou de courant).

Dans notre travail, le moteur asynchrone est alimenté par un variateur de fréquence commandé par la loi  $V/f$  constant. La variation de la vitesse est obtenue par la variation de la pulsation statorique qui est générée directement par le régulateur de vitesse. En effet, les entraînements de pompes sont classés parmi ceux exigeant une moindre qualité de régulation. Ils ne fonctionnent généralement que dans un sens de rotation et sans freinage (fonctionnement dans un seul quadrant) [7].

La problématique envisagée dans ce mémoire, consiste à maîtriser le fonctionnement d'une station de pompage d'eau chaude équipée d'un moteur asynchrone entraînant une pompe centrifuge. Il comporte quatre chapitres:

- Le premier chapitre est consacré à l'analyse du processus technologique de la station de pompage d'eau chaude qui fait l'objet de la description générale de la station.
- Le deuxième chapitre est réservé au choix de l'entraînement électrique et de l'automatisation, au calcul de charge des mécanismes et au calcul de puissance.
- La modélisation de la machine asynchrone ainsi que le principe de la commande scalaire font l'objet du troisième chapitre.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'élaboration du schéma de commande du système d'entraînement et l'analyse des caractéristiques dynamiques de l'installation de pompage.

## Chapitre I

# **Analyse du processus technologique des stations de pompage d'eau chaude**

## **I-1 Introduction**

Le besoin en eau chaude sanitaire est très variable suivant les ménages. D'une part à cause du nombre d'occupants et d'autre part à cause des habitudes d'utilisation. Dans les installations collectives, le système devra pouvoir délivrer une quantité d'eau chaude suffisante lors de soutirages simultanés pour différentes applications [8,9].

Les installations de production d'eau chaude sanitaire (pecs) sont destinées à fournir de l'eau potable à différents consommateurs tant domestiques qu'industriels. On en utilise dans l'économie moderne d'importantes quantités ; les foyers domestiques en consomment individuellement des quantités relativement faibles par rapport à la consommation dans les hôtels, hôpitaux, cuisines collectives, etc..., mais c'est les établissements industriels, tels que laveries, abattoirs, piscines, usines diverses, qui en consomment les plus grosses quantités [10]. Les éléments constitutifs d'une station de pompage, sont déterminés en fonction de la mission pour laquelle elle est étudiée, et la conception de la station est très variable suivant des paramètres tels que le liquide véhiculé, le site ou le climat [11].

## **I-2-Production de chaleur**

L'énergie nécessaire au chauffage de l'eau est produite par l'électricité, le gaz ou le fioul. La production de chaleur peut être assurée par des chaufferies, comme elle peut être assurée par des centrales de production de chaleur, dans le cas d'un système de chauffage urbain. La Centrale de production délivre une énergie thermique en garantissant la température du fluide énergétique (caloporteur : eau chaude à 90°C, eau surchauffée à plus de 110°C) qui circule dans un réseau dite « primaire », vers des sous-stations où se trouvent les échangeurs thermiques et le préparateur d'eau chaude sanitaire. Ces stations assurent la production d'eau chaude sanitaire. Elles sont plus simple, moins encombrante, et surtout non polluante [12].



**Figure I.1 :** Chaudière utilisée dans la centrale de STRASBOURG-HAUTEPIERRE



**Figure I.2 :** Quatre chaudières à bois assurent le chauffage de locaux et d'ECS à distance

L'énergie solaire peut être utilisée pour la production d'eau chaude si elle est accompagnée d'un système d'appoint d'énergie permettant de respecter les températures de l'eau chaude

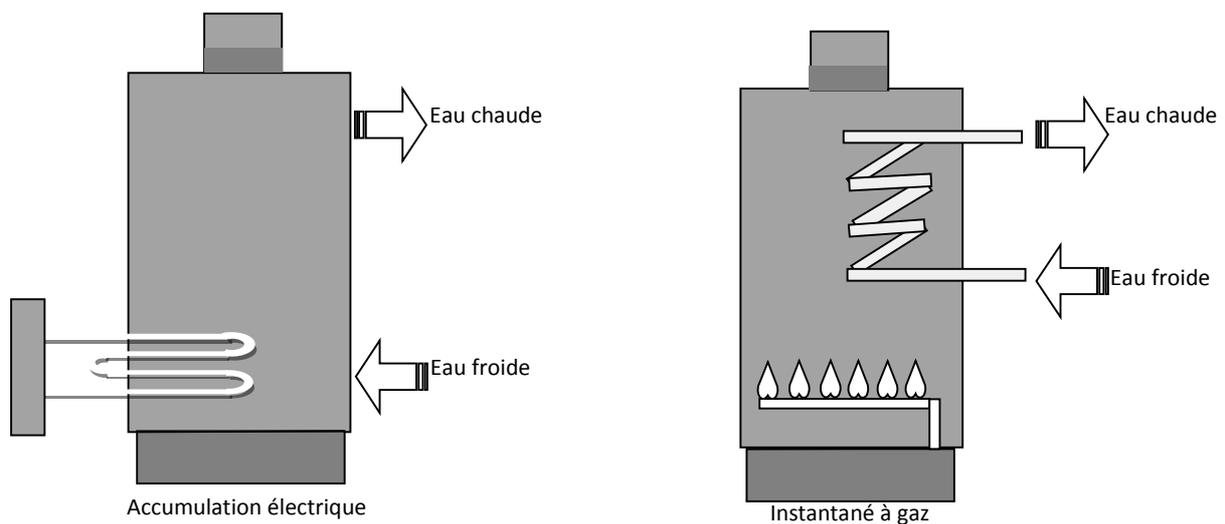
[13]. Les risques de légionellose sont importants et les performances énergétiques de ces installations sont faibles [14].

### I-3-Installations de production d'eau chaude

#### I-4-Modes de production d'eau chaude

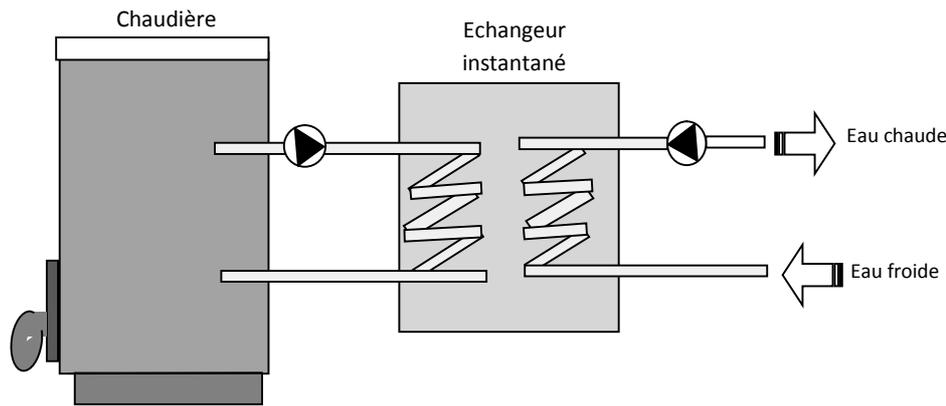
La préparation de l'eau sanitaire peut être effectuée de deux façons [8,9] :

**I-4-1-Directement** : l'eau est réchauffée par une résistance électrique (ballon à accumulation) ou par les gaz de combustion (chaudière). La production est assurée par plusieurs chaudières ou des ballons électriques pour la production dans l'habitat collectifs, le commerce et l'industrie.



**Figure I.3** : Schéma de la production directe d'eau chaude.

**I-4-2-Indirectement** : la production indirecte fait intervenir un échangeur dont le secondaire est constitué par le circuit d'eau chaude, le circuit primaire étant alimenté en fluide chauffant (eau chaude ou vapeur basse pression) à partir d'une chaudière ou d'une chaufferie plus ou moins importante.



**Figure I.4** : Schéma de la production indirecte d'eau chaude.

En effet, on peut classer les différents modes de production d'ECS en

- Production instantanée,
- Production semi-instantanée ou en semi-accumulation,
- Production en accumulation.

La différence entre ces types de production provient du rapport entre la puissance de production et le volume de stockage choisi pour assurer le confort d'utilisation [15,16] :

**I-4-a-Production instantanée** : l'eau est produite à la demande par un échangeur instantané (en général échangeur à plaques). La production instantanée ne nécessite aucun stockage et évite la stagnation de l'eau. Elle requiert toutefois une grande puissance énergétique. Pour les grandes installations de production, plusieurs systèmes instantanés peuvent être installés.

Les avantages de système instantané sont:

- ✓ L'eau chaude ne stagne pas dans le préparateur,
- ✓ D'un point de vue hygiénique, le risque de légionelle sont réduits

Les inconvénients sont:

- ✓ Risque de formation de tartre dans le serpent
- ✓ La température de soutirage fortement variable. Elle dépend de la température au primaire.

C'est à cause de ces inconvénients que l'utilisation de préparateurs d'eau chaude instantanée a régressé, ces dernières années. Le système semi instantané est cependant intéressant dans des cas spécifiques.

**I-4-b-Production en accumulation** : l'eau est produite et stockée dans des ballons de production, avec un stockage égal au volume puisé journalier. La puissance nécessaire pour la production correspond à la puissance de réchauffage en 6 à 8 heures (heures creuses, nuit).

Les avantages des systèmes collectifs de production d'eau chaude sanitaire à accumulation sont les suivants [10] :

- ✓ La capacité du réservoir permet d'assurer les surcharges de pointe.
- ✓ Possibilité de fournir d'importantes quantités d'eau en peu de temps.
- ✓ Température de l'eau chaude généralement réglable.
- ✓ Puissance importante sur la production d'eau chaude, même pour de petites chaudières.

Les inconvénients de système de production en accumulation sont :

- ✓ Les risques de corrosion dans le réservoir avec dépôt de tartre,
- ✓ Le coût d'investissement plus élevé qu'un système instantané,
- ✓ L'encombrement plus important,

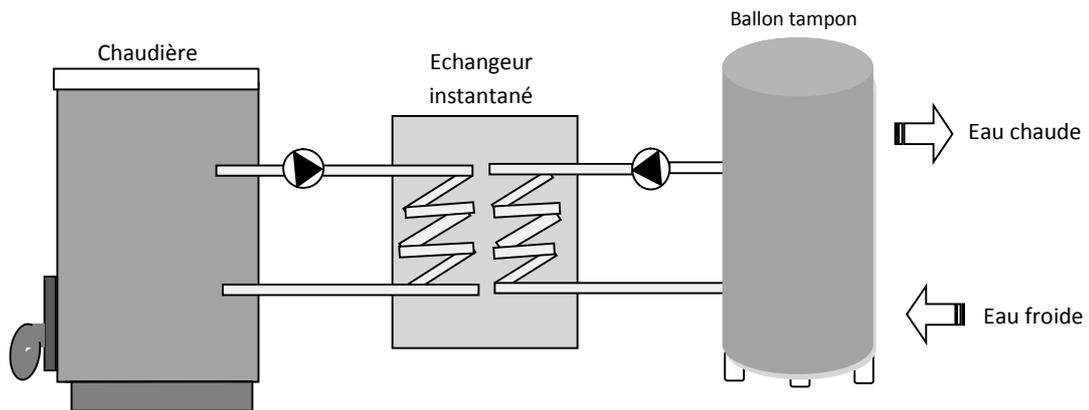
#### **I-4-c-Production semi-instantanée ou en semi-accumulation**

Une solution mixte, avec échangeur instantané et ballon de stockage, est la plus appropriée au mode de consommation d'ECS dans la plupart des applications courantes. Elle réalise un bon compromis entre les deux premières solutions (encombrement et puissance en chaufferie raisonnables, bonne stabilité de la température de l'eau chaude sanitaire).

##### ➤ **Production semi-instantanée**

L'eau est chauffée par un échangeur à plaques. Elle transite ensuite par un ballon tampon qui est presque maintenu en température par le bouclage de l'eau chaude. Ce ballon tampon est nécessaire uniquement pour le stockage de l'eau afin de pallier les crêtes de consommation. La capacité tampon est suffisante pour absorber les variations de température de soutirage [17]. Le temps théorique de séjour de l'eau est de 4 à 8 heures.

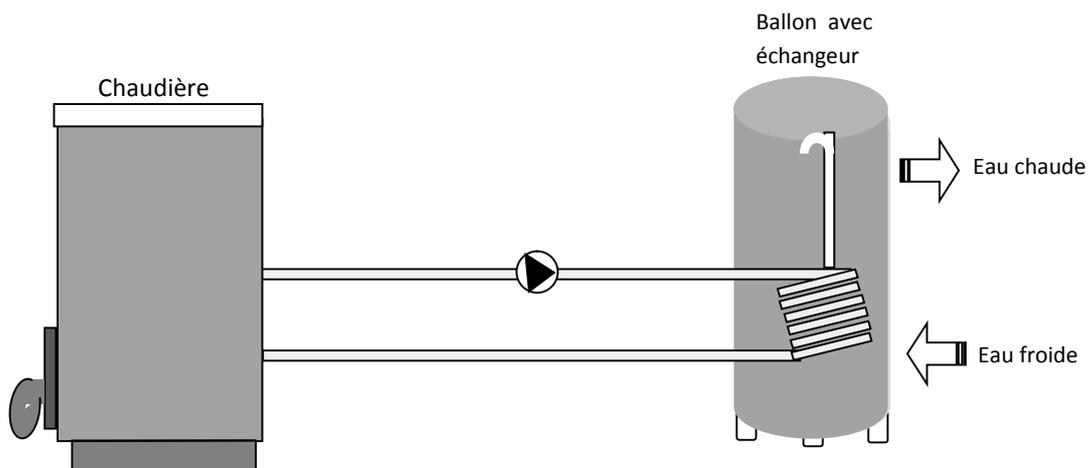
- avec un stockage limité, inférieur à certains appels, mais une puissance permettant de préparer le complément nécessaire pendant la durée de l'appel.



**Figure I.5 :** Schéma de la production semi-instantanée d'eau chaude.

➤ **Production semi-accumulée**

Elle met en œuvre plusieurs ballons qui sont maintenus en température par le bouclage de l'eau chaude, et dont les pompes fonctionnent en permanence, avec un volume de stockage correspondant au volume prélevé lors d'une période de pointe et une puissance suffisante à la remise en température du stock entre deux pointes. La capacité de réchauffage est rapide (environ 20 à 30 minutes, si on utilise le gaz et le fioul, mais de 6 heures environ pour les ballons électriques). Le temps de séjour théorique de l'eau est de 6 à 8 heures. Ces installations sont généralement réalisées par l'intermédiaire d'un réservoir équipé d'un réchauffeur en épingle ou en serpentín.



**Figure I.6 :** Schéma de la production semi-accumulée d'eau chaude.

• Exemple de production semi-instantanée :

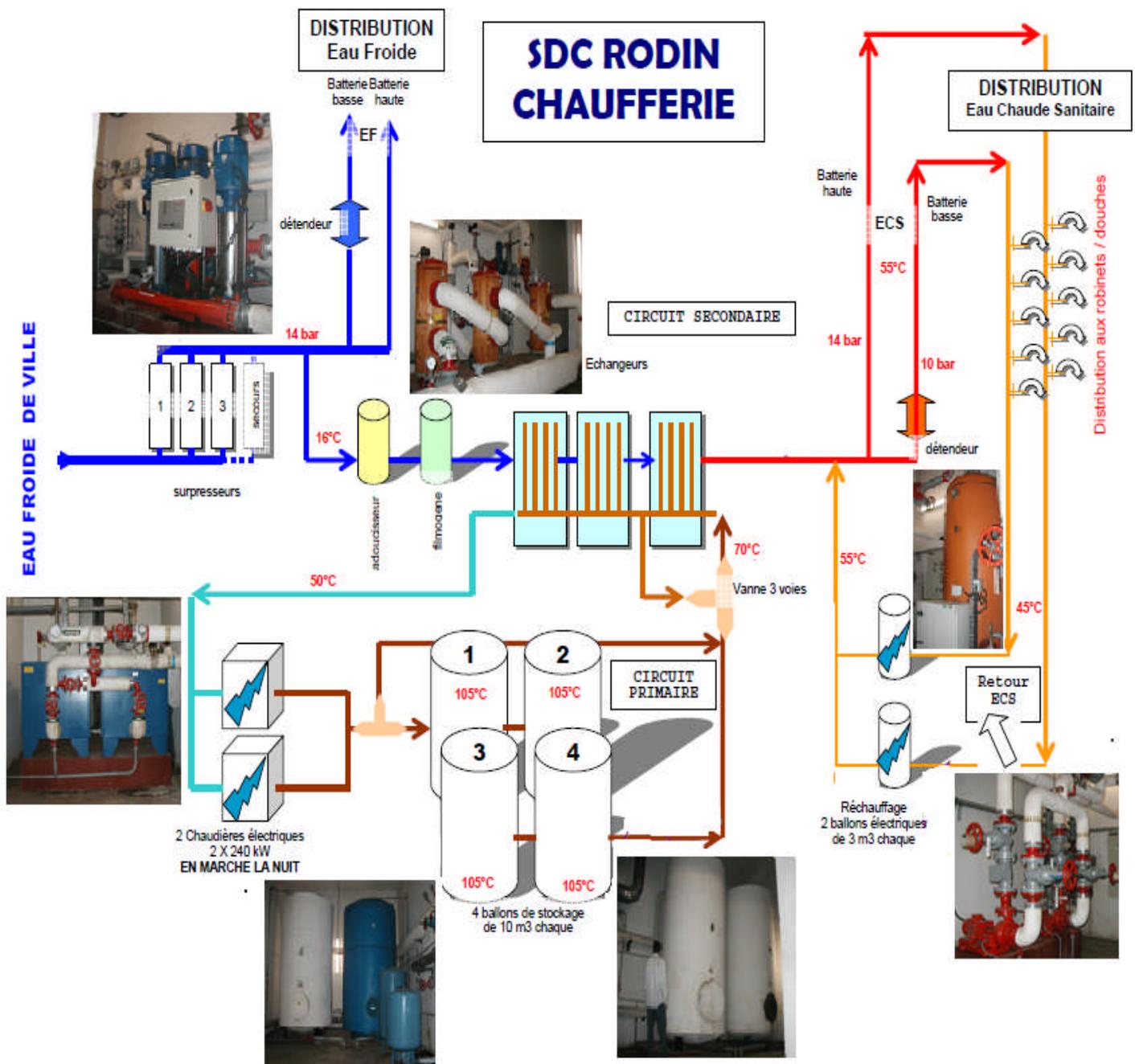


Figure I.7: Schéma globale d'une station de pompage d'eau chaude [18].

Dans cet exemple la production de l'eau chaude est assurée par une chaufferie qui contient deux chaudières électriques qui chauffent le fluide caloporteur du circuit primaire. Ce fluide étant stocké dans les quatre ballons de stockage (10 m<sup>3</sup> chacun). Le fluide caloporteur tourne en circuit fermé dans la chaufferie pour réchauffer l'eau froide sanitaire adoucie dans les échangeurs. Ces 3 échangeurs permettent le réchauffage de l'eau par échange calorifique entre le fluide du circuit primaire stocké dans les ballons (sa température peut approcher les 105°)

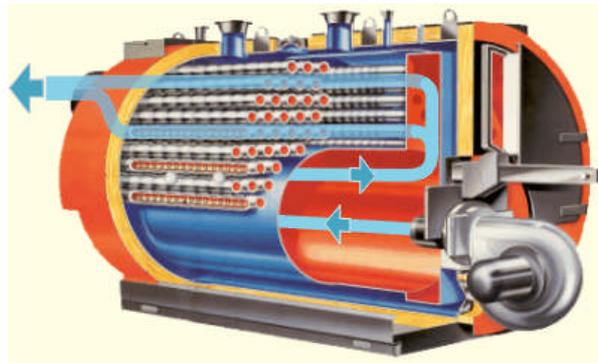
et l'eau froide adoucie. C'est cette dernière qui sera distribuée aux robinets, chaude, sans jamais avoir été mélangée avec le fluide des ballons. Sur le retour, on trouve deux pompes de circulation qui permettent la réinjection de l'eau chaude, qui n'a pas été puisée, dans les deux ballons de réchauffage (3 m<sup>3</sup> chacun).

Lors des périodes de pointe, l'eau chaude soutirée provient à la fois du ballon et de l'échangeur.

### I-5-Appareils de production d'eau chaude

#### I-5-1-Chaudière

Les chaudières utilisées pour le réchauffage direct de l'eau sont du type «à tube de fumée». Dans ces chaudières, qui sont presque toujours en acier, l'eau chaude circule à l'extérieur des tubes, elles sont équipées quelquefois d'un orifice de vidange et d'un orifice de purge [8].



**Figure I.8** : Schéma d'une chaudière à production d'eau chaude



**Figure I.9** : Chaudières fioul/gaz

Si la puissance de l'installation dépasse 70 kW, les chaudières sont installées obligatoirement dans un locale (chaufferie) réservé à cet effet. Les caractéristiques de la chaufferie sont réglementées en particulier pour des raisons de sécurité (incendie, ventilation, etc.) [17].

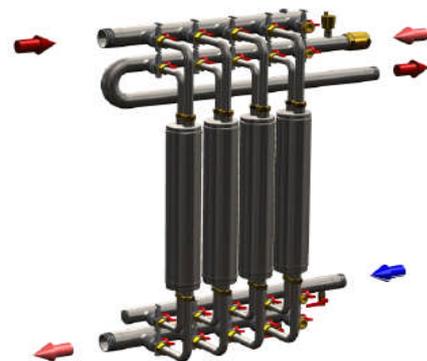
**I-5-2-Echangeurs** : Il s'agit de réchauffeurs tubulaires ou à plaques dont les volumes d'eau primaire et secondaire sont très faibles.

- Echangeurs à plaques : réalisés en acier inoxydable, ces échangeurs sont constitués de plaques parallèles planes ou en spirales.
- Echangeur tubulaires: réalisé généralement en acier, ils sont constitués d'un faisceau de tubes (tubes en U) placé à l'intérieur d'une double enveloppe.

Pour couvrir les besoins et en fonction de la puissance souhaitée, plusieurs échangeurs seront montés en parallèle ou en série.



**Figure I.10:** Echangeur à plaques planes.



**Figure I.11:** Echangeur à plaques en spirales



**Figure I.12:** Trois échangeurs tubulaires montés en série [18].

### **I-5-3-Ballons de production et stockage d'eau chaude**

On distingue deux types essentiels de ballons de production d'eau chaude [8] :

#### **I-5-3-1-Ballons électriques**

Il s'agit de ballons à accumulation de grand volume. A l'intérieur sont placées des résistances électriques (en forme U). Les ballons de chauffage électrique sont le plus souvent réalisés en tôle d'acier revêtue (galvanisé, ciment, résines de synthèse).

#### **I-5-3-2-Ballons à accumulation**

Le réchauffage de l'eau est assuré par un échangeur tubulaire placé à l'intérieur du ballon (l'eau de chauffage circule à l'intérieur des tubes). Cet échangeur tubulaire peut lui-même être constitué d'un :

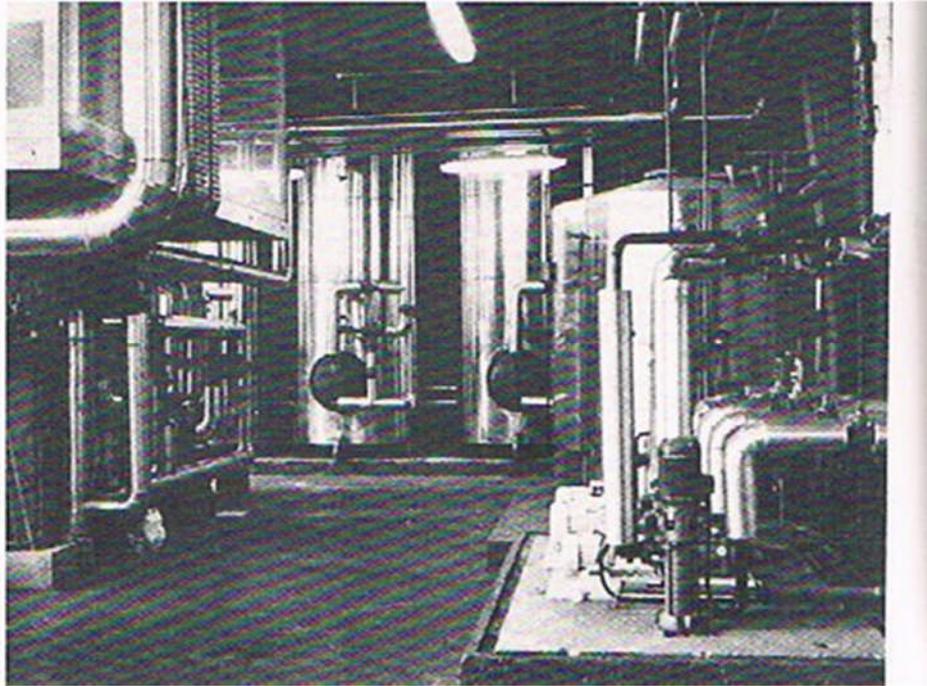
- faisceau de tubes en U (c'est le cas le plus fréquent)
- un ou plusieurs tubes en spirales à axe horizontal ou vertical

Les ballons sont, en général, en acier galvanisé, en acier noir, ou en acier cimenté.



**Figure I.13** : deux grands ballons d'eau chaude avec deux vases d'expansions.

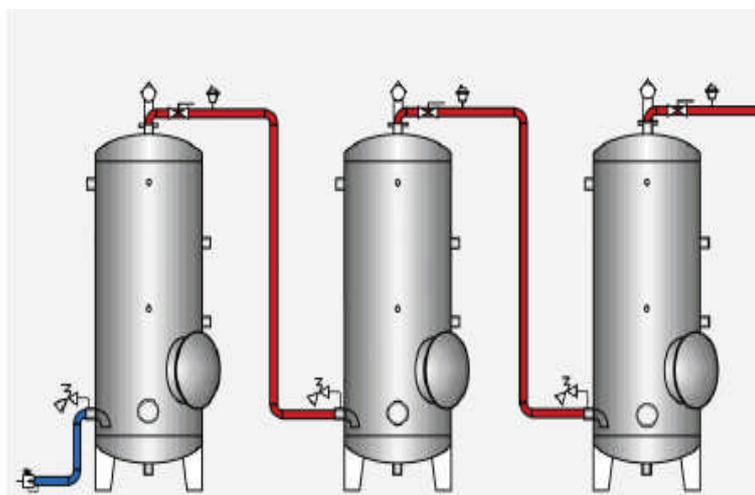
- **Exemple de production d'eau chaude** en utilisant trois ballons à accumulation dans la cité la croix du sud de Chevely Larue [8] :



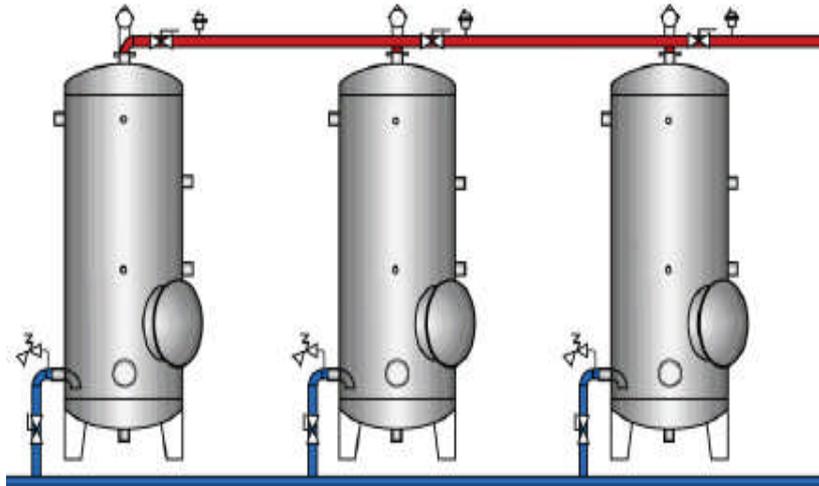
**Figure I.14:** Production d'eau chaude par trois ballons verticaux de 6000litres.

### I-5-3-3-Raccordement des ballons

L'approvisionnement en eau chaude sanitaire est fait par le raccordement de plusieurs ballons ou par l'installation de ballons de grande capacité. Le montage de plusieurs ballons en série permet de mieux satisfaire les besoins de pointe et d'éviter des circulations préférentielles par un des ballons [19].



(a)



(b)

**Figure I.15:** raccordement des ballons de production d'eau chaude en série(a) et en parallèle(b).

#### **I-5-4-Vase d'expansion sanitaire**

Le vase d'expansion pour eau chaude sanitaire limite l'écoulement d'eau par le groupe de sécurité. Il permet d'absorber une partie de la dilatation, provoquée par la pression de l'eau chaude, son choix dépend du volume du ballon, de la pression d'origine et de l'élévation de température [10].

#### **I-6-Température de l'eau chaude sanitaire**

La température de l'eau est un facteur important conditionnant la survie et la prolifération de la bactérie (légiionelles) dans les réseaux d'eau. L'eau devrait être chauffée à au moins 60 °C en incluant le fond du réservoir et distribuée à une température suffisante pour limiter la croissance de la bactérie. Dans la monographie de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), il est recommandé d'emmagasiner l'eau à l'intérieur du chauffe-eau à 60°C ou plus et qu'au moins une fois par jour, la température de l'eau atteigne au moins 60 °C dans l'ensemble du réservoir incluant la partie inférieure. Il est également recommandé que l'eau soit distribuée jusqu'aux robinets à une température d'au moins 50 °C [20].

Pour limiter la présence de légionelles et éviter le risque de brûlure, l'eau chaude doit respecter les températures suivantes [13]:

- $\geq 55^{\circ}\text{C}$  au niveau de la mise en distribution (sortie du préparateur d'eau chaude ou du ballon de stockage s'il est couplé au préparateur).

- Un écart de température entre le départ et le retour de boucle inférieur à 5°C, le retour de boucle devant présenter une température supérieure à 50°C.
- Une température, en tout point du réseau, supérieur ou égal à celle relevée en retour de boucle.

Il est recommandé de suivre l'évolution de la température, de préférence en continu, au moyen de sondes de température et d'un enregistreur relié à un logiciel dédié à la gestion technique centralisée [13].

### **I-7-Réseau de distribution d'eau chaude**

La configuration des réseaux doit être la plus simple possible avec de bonne isolation de la tuyauterie, afin d'éviter la stagnation de l'eau et la baisse de température de l'eau chaude, ainsi que pour permettre des traitements de désinfection plus efficaces et rapides. Les extrémités des colonnes montantes doivent être équipées d'anti-béliers et de purgeurs. Afin de pouvoir réaliser des chocs thermiques, il est souhaitable de prévoir des prises de raccordement des échangeurs mobiles d'appoints qui seraient utilisés ou rajoutés en cas de manque de puissance thermique [13].

Lorsque les points de puisage sont éloignés de la production d'ECS, une canalisation «retour» permet d'éviter le refroidissement du réseau grâce à une circulation permanente de l'eau chaude. On parle de réseaux boucles ou de bouclage des réseaux. La circulation dans les boucles, même les plus éloignées, permet d'obtenir une eau chaude dans un délai très court [21]. Il est particulièrement important de veiller à ce que les installations d'eau chaude soient correctement dimensionnées afin d'assurer des vitesses minimales de circulation. Les diamètres des canalisations se calculent selon un guide technique de conception et de mise en œuvre des réseaux d'eau chaude.

### **I-8-Éléments constitutifs d'une station de pompage**

Une station de pompage est constituée principalement par une ou plusieurs pompes, leur moteur d'entraînement, leur robinetterie, l'alimentation électrique, les dispositifs de nettoyage du liquide avant pompage, les tuyauteries internes à la station, les anti-bélier, les vases d'expansion, l'ensemble des systèmes de commande et de contrôle et l'ensemble des moyens de maintenance [11].

#### **I-8-1-Pompes**

Étant au cœur de l'installation, la pompe qui doit être définie avec le plus grand soin ainsi que son moteur d'entraînement.

On appelle une pompe une machine hydraulique capable d'élever la pression d'un fluide, autrement dit, de lui communiquer de l'énergie [23].

Dans une station de pompage, les pompes constituent l'élément essentiel, sur lequel tout ou presque va se greffer. Le premier choix est donc celui de la pompe : volumétrique ou centrifuge, unique ou multiple, etc [11].

### **I-8-1-1- Pompe volumétrique**

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. En effet, l'écoulement résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide [24].

Elles sont utilisées en premier lieu pour les applications à faible débit et à grande hauteur manométrique. Lorsque la vitesse est variable, le débit varie proportionnellement à celle-ci. La variation du débit n'est possible que par modification de la vitesse ou du nombre de cycles, ou bien en prévoyant des installations supplémentaires (by-pass) [25]. On distingue deux types de pompes volumétriques : les pompes alternatives (à piston, à diaphragme, ...) et les pompes rotatives (à vis, à engrenage, à palettes, hélicoïdales, péristaltiques ...).

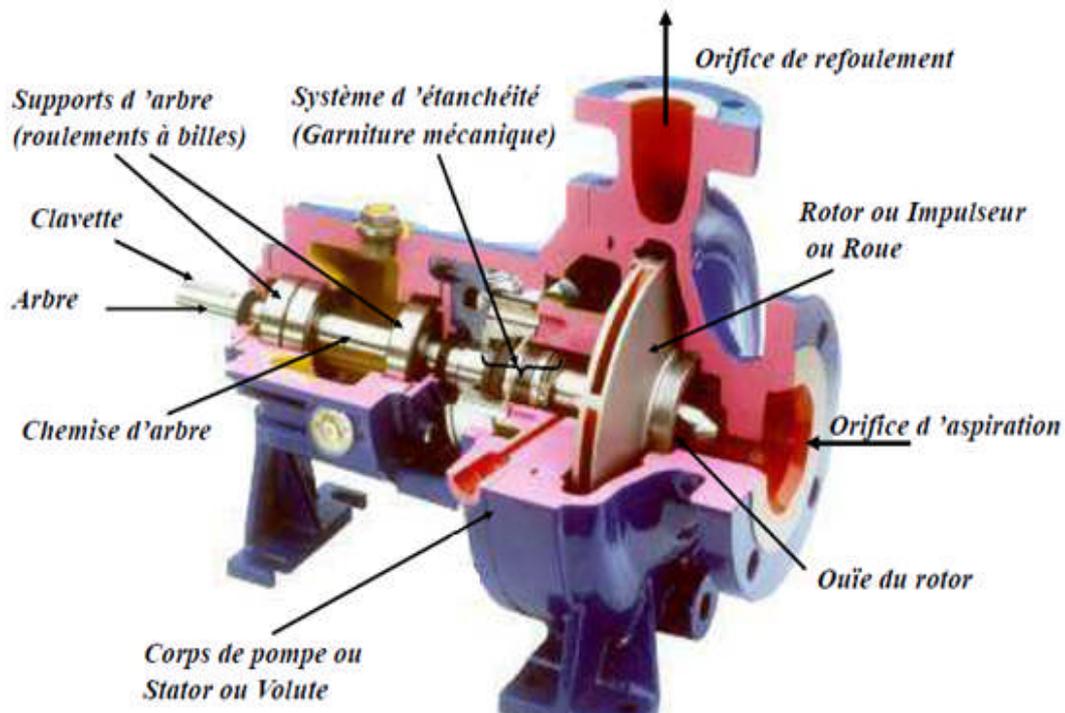
### **I-8-1-2-Pompes centrifuges**

Les pompes centrifuges sont composées d'une roue à aubes qui tourne autour de son axe, d'un stator constitué au centre d'un distributeur qui dirige le fluide de manière adéquate à l'entrée de la roue, et d'un collecteur en forme de spirale disposé en sortie de la roue appelé volute.

Le moyen le plus simple et le plus répandu pour véhiculer des liquides est la pompe centrifuge qui est aussi le moyen le plus économique [22].

Cela s'explique par leurs caractéristiques suivantes [25]:

- construction robuste,
- conception simple,
- coûts de fabrication peu élevés,
- possibilité de régulation.



**Figure I.16 :** Composition d'une Pompe centrifuge.

### **I-8-1-2-1-Fonctionnement d'une pompe centrifuge**

La théorie du fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmentée. Cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique. L'énergie du fluide augmente en lui donnant une accélération tangentielle (ou rotation par rapport à l'axe de l'écoulement) durant son passage dans la pompe. Cette énergie est fournie par la roue, entraînée par un moteur. Pour donner cette accélération tangentielle au fluide, les aubes de la roue poussent le fluide vers l'extérieur [1,26].

### **I-8-1-2-2-Caractéristiques de la pompe**

D'un point de vue hydraulique, les trois principaux paramètres qui caractérisent une pompe centrifuge sont :

- Le débit volumique  $Q$ : c'est le volume refoulé pendant l'unité de temps. Il s'exprime en mètres cubes par seconde ( $m^3/s$ ) ou plus pratiquement en mètres cubes par heure ( $m^3/h$ ).

- La hauteur manométrique H : On appelle Hauteur manométrique H d'une pompe, l'énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du liquide qui la traverse [24]. C'est la somme de la hauteur géométrique dans les niveaux du liquide et les pertes de charge causées par de frottements intérieurs qui se forment au passage du liquide dans les tuyaux, dans la pompe et les accessoires hydrauliques.
- Le rendement  $\eta$ : Le rendement d'une pompe est le rapport de la puissance utile « Ph » (puissance hydraulique) communiquée au liquide pompé à la puissance absorbée « Pa » par la pompe ou par le groupe (aux bornes du moteur).

$$\eta = \frac{P_h}{P_a}$$

L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_h = \rho g H Q$$

$P_h$  : puissance hydraulique de la pompe (en Watt),

$\rho$  : masse volumique de l'eau (=1000 kg/m<sup>3</sup>),

H : hauteur manométrique,

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,

Q : le débit en (m<sup>3</sup>/h).

### **I-8-1-3-Point de fonctionnement d'une pompe**

Le point de fonctionnement d'une pompe centrifuge se situe toujours à l'intersection entre la courbe de pompe et la courbe de réseau.

### **I-8-1-4-Fonctionnement des pompes en série et en parallèle**

Un système peut être alimenté par plusieurs pompes. Elles peuvent être installées en série ou en parallèle de façon à augmenter respectivement la pression ou le débit [26 ,27].

- Pour deux ou plusieurs pompes en série, on obtient la caractéristique de l'ensemble des pompes en additionnant, à débit constant, les hauteurs manométriques totales de chaque pompe.
- Pour deux ou plusieurs pompes en parallèle, on obtient la caractéristique de l'ensemble des pompes en additionnant, pour une hauteur manométrique totale donnée, les débits fournis par chaque pompe.

### I-8-1-5-Différents types de pompes centrifuges

Il existe un très grand nombre de type de pompes centrifuges. On peut les classer de plusieurs manières, en tenant compte, notamment [1] :

- Du nombre de roue (monocellulaire ou multicellulaires),
  - De la forme des aubes de la roue (à écoulement radiale, à écoulement semi axiale, à écoulement axiale),
  - De la direction de l'axe (horizontale ou verticale),
  - De la position de la pompe par rapport au niveau à l'aspiration,
  - Du type d'effluent à pomper.
- **Pompe monocellulaire:** Pompe constituée d'un seul rotor
- **Pompe multicellulaire:** Plusieurs roues peuvent être associées sur un même arbre de manière à augmenter la HMT globale de la pompe. Le fluide passe de roue en roue à l'intérieur d'un même corps, sa pression augmente au passage de chaque roue, le débit reste le même dans chaque roue



(a)



(b)

**Figure I.17 :** pompe monocellulaire (a) et multicellulaire (b)

### I-8-1-6-Technologie des pompes centrifuges

La technologie des pompes a évolué lentement. La réduction de taille s'accompagne, en outre, de l'accroissement simultané des débits, des niveaux de pression et de température [22].

### I-8-1-7-Matériaux constitutifs des pompes

Les matériaux doivent être choisis en fonction de l'ensemble de l'installation, de la pression et de la température de l'eau, ainsi que de la nature de l'eau (adoucie, déminéralisée ou conditionnée) [11]. Les matériaux utilisés couramment dans la construction des pompes sont les fontes, les aciers, les aciers inoxydables et les alliages de cuivre. Pour des cas

particuliers, surtout dans les industries chimique et pétrolière, des alliages de nickel, d'aluminium, de plomb, de titane ainsi que des matières non métalliques sont souvent employés [1].

Liquide pompé	Limite d'application	Matériaux: corps/roue		
		Fonte grise / Fonte grise	Fonte grise / bronze ordinaire	bronze ordinaire/ bronze ordinaire
Eau pure	$T \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}; p \leq 10 \text{ bar}$	X		
Eau de mer	$T \leq 25 \text{ }^\circ\text{C}; p \leq 10 \text{ bar}$			X
Eau brute	$T \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}; p \leq 10 \text{ bar}$	X		
Eau de piscine (eau douce)	$T \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}; p \leq 10 \text{ bar}$	X		
Eau potable	$T \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}; p \leq 10 \text{ bar}$		X	
Eau de chauffage	$T \leq 110 \text{ }^\circ\text{C}; p \leq 10 \text{ bar}$	X		
Eau de barrage	$T \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}; p \leq 10 \text{ bar}$		X	

**Tableau I.1:** différents matériaux utilisés dans la construction des pompes

Dans le domaine de la tenue à la température et à la corrosion, les aciers inoxydables se sont grandement répandus en raison d'un prix plus modéré que dans le passé [22].

### **I-8-1-8-Température limite**

En fonctionnement normal, si la pompe n'est pas équipée d'un système de refroidissement, les températures atteintes à la surface du corps de pompe, à l'étanchéité d'arbre, aux paliers, correspondent à la température du fluide pompé. La température maximale admissible dépend de la classe de température retenue lors de la définition des conditions de service par l'acquéreur et confirmée par le fournisseur [28].

### **I-8-2-Circulateurs d'eau chaude (Pompes de circulation)**

Cela concerne aussi bien les circulateurs de chauffage que les pompes de circulation d'eau chaude sanitaire. Le but est d'accélérer la circulation pour maintenir une température égale dans l'ensemble du circuit, et de réduire les sections de tuyauteries.

Ce sont des pompes centrifuges monoblocs, sans presse-étoupe, le rotor du moteur étant noyé dans le liquide pompé et le stator isolé par une chemise fixe et amagnétique, du moins pour les petites puissances [22].



**Figure I.18** : pompe centrifuge monobloc.

Le débit d'une pompe de circulation d'eau chaude est destiné à compenser les pertes de chaleur de la tuyauterie « aller » qui sont de l'ordre de 60 kJ/h (15 kcal/h) pour un diamètre 15x21 et de 300 kJ/h (70 kcal/h) pour un diamètre du 100 mm/m de tuyauterie calorifugée. Ces pompes travaillent sous une hauteur géométrique nulle car elles sont en circuit fermé ; seules comptent les pertes de charge. La pompe doit comporter un secours (il existe des pompes doubles) ou au moins un by-pass pour maintenir une circulation en cas de panne. Pour l'eau chaude, elle sera de préférence installée sur le circuit de retour pour assurer une meilleure répartition aux points de puisage [22]. La pompe de circulation doit pouvoir compenser la perte de charge de l'installation, c'est-à-dire la perte de charge du réseau plus la perte de charge de la production (échangeur à plaques, clapet anti-retour, etc.), et fournir un débit de circulation égale à la somme des débits souhaités dans chacune des boucles [13, 21].

### **I-8-3-Groupe électropompe**

Quelque soit le type de pompe, le groupe électropompe est constituée de 3 parties distinctes:

- la partie « moteur » qui fournit la puissance nécessaire au pompage,
- l'accouplement qui transmet cette puissance à la partie hydraulique
- la partie hydraulique qui transmet cette puissance à l'eau pour la déplacer (l'aspirer et/ou la refouler).

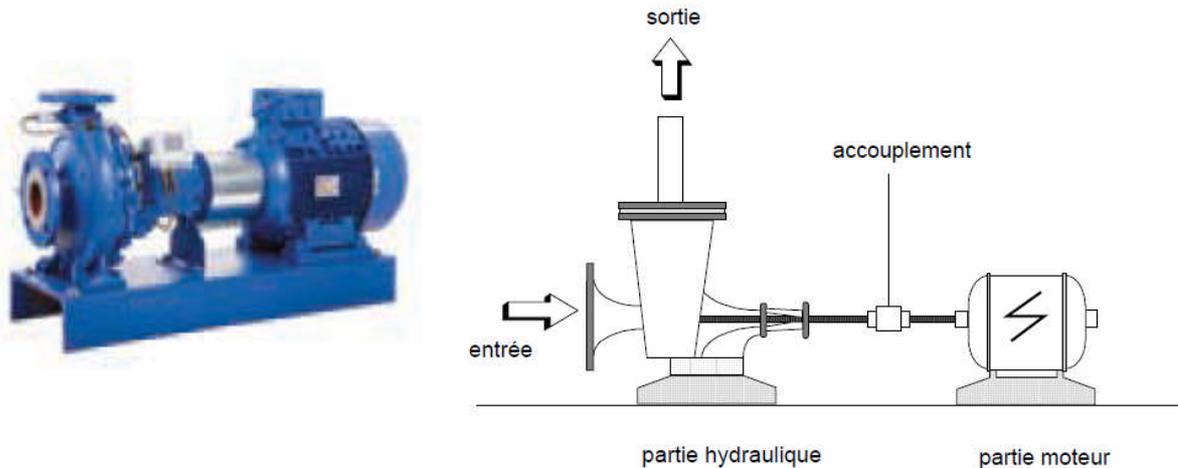


Figure I.19 : représentation d'un groupe électropompe

#### I-8-4-Les moteurs d'entraînement

Le choix du type du moteur dépend de plusieurs facteurs tels que fiabilité, support technique, prix,...etc [11].

- **Les moteurs à courant continu** ne sont utilisés qu'avec des variateurs de vitesse ou une alimentation par cellules solaires.
- **Les moteurs à bagues et collecteur** ne sont généralement utilisés que pour de faibles puissances pour les applications domestiques
- **Les moteurs thermiques** sont utilisés dans les cas où l'électricité n'est pas disponible ou bien pour des raisons de sécurité. Ce sont de plus en plus les moteurs Diesel qui entraînent les pompes, soit directement, soit indirectement par l'intermédiaire d'un groupe électrogène.

Bien que leur emploi reste limité aux groupes mobiles ou de secours en raison de leur prix, de leur poids, de leur encombrement, etc., l'élévation de leur vitesse est un élément favorable.

- **Les turbines hydrauliques** sont utilisées lorsque des chutes d'eau sont disponibles et souvent pour de grandes puissances. Pour de petites ou moyennes puissances, on peut employer des pompes travaillant en turbine.
- **Les turbines à vapeur** sont utilisées dans les industries où la vapeur est disponible et elles se sont développées grâce à un abaissement des prix. Elles procurent les avantages d'utiliser une énergie parfois bon marché, d'être un secours en cas de panne d'électricité, d'avoir une vitesse variable élevée, et d'être antidéflagrantes. La vapeur d'échappement peut servir pour du réchauffage. En pratique, elles sont utilisables seulement avec des pompes centrifuges (faible couple au démarrage, vitesse élevée).

- **Les moteurs hydrauliques** ont l'avantage d'être antidéflagrants et à vitesse variable. Ils peuvent être utilisés dans des positions difficiles ou dangereuses [11].
- **Le moteur asynchrone** : il présente l'avantage d'être robuste, de construction simple et peu coûteuse. Le moteur asynchrone est utilisé depuis de très nombreuses années pour assurer la variation de vitesse de processus industriels. Il est très utilisé pour l'entraînement de pompes, de ventilateurs, de compresseurs, etc. [11,29] :
- **Le moteur-électrique à rotor en court-circuit** (à cage) est la solution presque générale.
- **Les moteurs à rotor bobiné** sont employés si le réseau électrique impose une réduction importante de l'appel de courant au démarrage ou parfois pour le démarrage de pompes volumétriques à couple de démarrage élevé. Ils sont également nécessaires pour l'emploi de certains variateurs de vitesse.

D'une manière générale, quel que soit leur type, ils sont déterminés (classe de protection, d'isolement et d'échauffement et d'efficacité énergétique) en fonction des lieux d'installation et des conditions d'exploitation [30].

### **I-8-5-Équipement électrique**

C'est un poste très important tant par son coût que par la fiabilité qu'il doit offrir. L'appareillage doit assurer la protection électrique du personnel, celle du matériel, le démarrage et l'interconnexion des groupes et des auxiliaires. L'installation comporte [11]:

- à partir de la ligne haute ou moyenne tension :
  - une cellule d'arrivée,
  - une cellule de protection et de coupure,
  - un transformateur ;
- à partir de la ligne basse tension :
  - les organes de livraison, de comptage, de protection et de coupure en cas de liaison directe à un réseau basse tension,

### **I-8-6-Système de commande et de contrôle**

#### **I-8-6-1-Armoire de commande**

L'armoire de commande doit avoir en façade un voyant de mise sous tension, les voltmètres et ampèremètres, les commutateurs de groupes ou de fonctionnement (manuel, automatique, arrêt), les indicateurs ou alarmes pour disjonction, démarrage, désamorçage, etc., et les compteurs horaires, totalisateurs de débit et toutes autres indications particulières (niveaux, ouverture de vanne, etc.). À l'intérieur de l'armoire sont montés [11] :

- un sectionneur général ;
- les fusibles HPC (Haut Pouvoir de Coupure) et ceux des circuits auxiliaires, et les parafoudres ;
- les équipements de démarrage (direct, étoile-triangle, à résistances statorique) pour les pompes et équipements annexes ainsi que leur protection ;
- les transformateurs pour l'alimentation des télécommandes, des signalisations et des circuits de sécurité ;
- et des accessoires tels que thermostat, condensateurs, éclairage de secours, etc.
- une mise à la terre.

Les armoires comportent soit une simple signalisation par voyants lumineux, soit un synoptique. Sous les climats chauds et humides, elles doivent comporter des résistances de chauffage.



**Figure I.20 :** Armoire de commande électrique.

### **I-8-6-2-Contrôle**

La station peut être dotée de capteurs souvent électronique ou automatique assurant une meilleure protection des équipements et des personnes :

- Permutation des moteurs, thermostat de contrôle de température.
- Protection des moteurs (inversion de phase, temps de démarrage trop long, nombre de démarrages consécutifs limités).
- Contrôle de circulation de fluides (capteur de pression).

### I-8-6-3-Automates programmables industriels

Par définition, c'est un appareil électronique qui comporte une armoire programmable par l'utilisateur automatique à l'aide d'un langage adapté, pour stockage interne des instructions composant les fonctions d'automatisme (comptage, temporisation, calcul arithmétique, réglage, asservissement, régulation...). Son rôle est de commander le procédé et de remonter des informations utiles à l'exploitation des stations [1]. Les automates programmables sont couramment utilisés dans les stations de pompage. Ils permettent d'effectuer simplement toutes les séquences de fonctionnement.

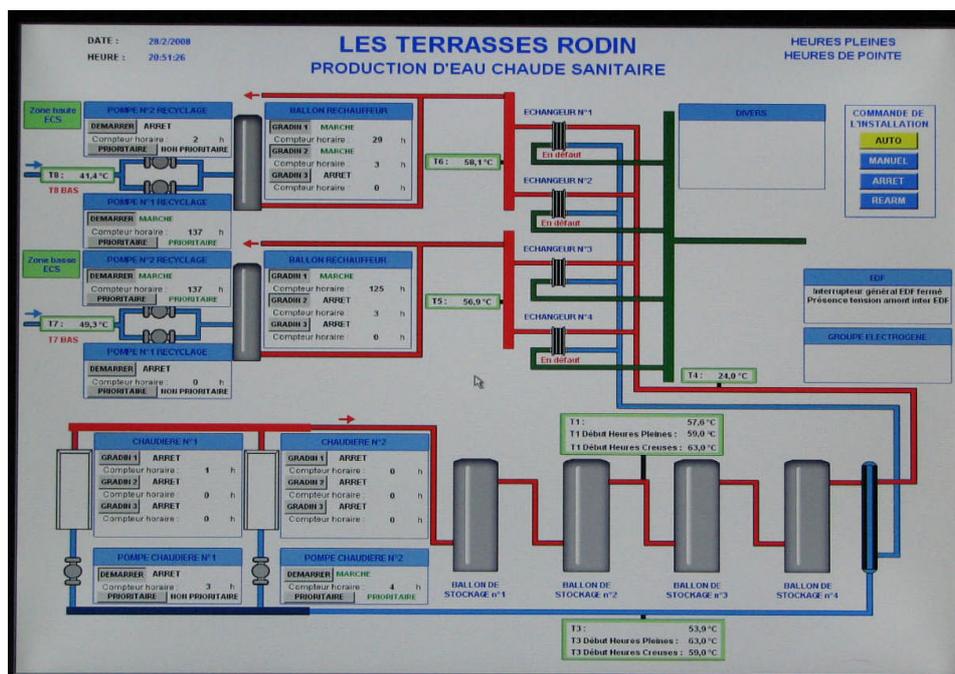


Figure I.21: L'écran de contrôle [18].

## I-9-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents modes de production d'eau chaude, ainsi que les éléments constitutifs de l'installation. Il est important de déterminer d'une façon précise les besoins en eau chaude qui conditionnent: le mode de production d'eau chaude, la capacité du préparateur, et éventuellement la puissance du générateur qui lui est associé. Toutefois, le choix du groupe électropompe dépend de la capacité de l'eau distribuée.

Le choix de système d'entraînement électrique d'une station de pompage d'eau chaude fera l'objet du prochain chapitre.

## Chapitre II

# **Choix de l'entraînement électrique et automatisation**

## II-1-Introduction

Un entraînement électrique est un système électromécanique destiné à réaliser un processus technologique grâce au mouvement d'un organe de travail. Il se compose principalement d'un moteur électrique et d'une machine productrice [7]. En électrotechnique, il est important de connaître les caractéristiques possibles du couple utile du moteur, ainsi que les caractéristiques du couple résistant (en fonction de la vitesse) de la charge mécanique accouplée avec le moteur. Cependant, le choix du moteur doit être compatible à la fois avec l'alimentation et avec la charge entraînée [31].

Le moteur asynchrone étant le moteur industriel par excellence, il s'est imposé dans un grand nombre d'applications grâce à sa robustesse, sa simplicité de construction, sa facilité d'entretien et de faible coût.

## II-2-Calcul des charges des mécanismes

### II-2-1-Couple de charge

Les couples de charge (couples résistants) peuvent le plus souvent être exprimés comme une fonction de la vitesse, représentés par la relation [32]:

$$c_r = c_{r0} + \beta \Omega^x \quad (\text{II-1})$$

avec :

$C_r$  : le couple résistant de la charge,

$C_{r0}$  : le couple de charge initial,

$\Omega$  : la vitesse de rotation du moteur,

$x$  : est un coefficient qui caractérise la variation du couple de charge en fonction de la vitesse

$\beta$  : est une constante.

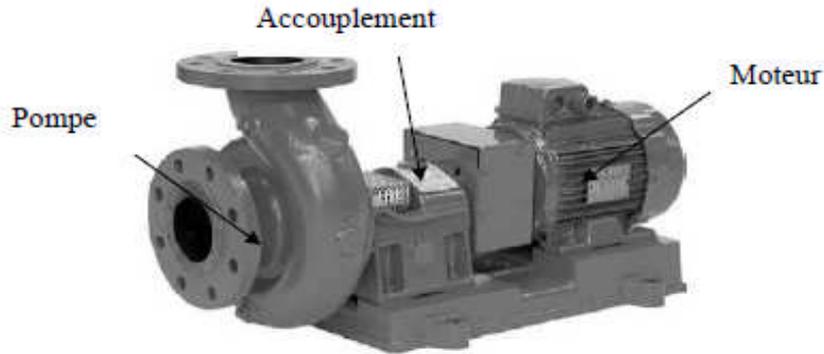
Dans le cas d'entraînements des pompes centrifuges le couple est proportionnel au carré de la vitesse [32].

$$c_r = c_{r0} + \beta \Omega^2 \quad (\text{II-2})$$

### II-2-2- Equation de mouvement du système d'entraînement

Le système d'entraînement d'une pompe centrifuge possède soit des accouplements rigides, soit des accouplements flexibles (élastiques). Les accouplements rigides raccordent essentiellement des arbres qui doivent être alignés parfaitement. L'accouplement flexible selon la norme DIN 740, est un élément de raccordement élastique, sans glissement, entre la

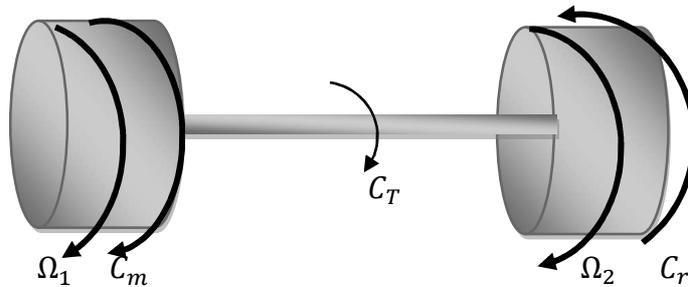
machine d'entraînement et la pompe, qui compense les défauts d'alignement axiaux, radiaux et angulaires et qui peut absorber les chocs pompe [33].



**Figure II.1 :** Groupe électropompe.

### II-2-2-1-Cas d'un accouplement élastique

Dans le cas où le système possède une élasticité, le système à deux masses est couramment utilisé dans de nombreuses études, notamment les systèmes composés de deux machines tournantes [34-36]. En effet, notre système composé d'un moteur électrique accouplé à une pompe centrifuge, peut être représenté comme suit:



**Figure II.2:** Schéma mécanique de calcul d'un système à deux masses séparées.

L'équation du mouvement du système d'entraînement électrique à deux masses s'écrit comme suit :

$$J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} = C_m - C_T - f_1 \Omega_1$$

$$J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} = C_T - C_r - f_2 \Omega_2$$

$$\varphi_1 = \int \Omega_1(t) dt$$

$$\varphi_2 = \int \Omega_2(t) dt$$

$$C_T = K(\varphi_1 - \varphi_2)$$

avec :

$J_1, J_2$  : moment d'inertie de la première et de la deuxième masse,

$\varphi_1, \varphi_2$  : position angulaire respective au deux masse,

$\Omega_1, \Omega_2$  : vitesse de rotation de la première et de la deuxième masse respectivement,

$C_m$  : couple moteur,

$C_r$  : couple résistant de la pompe,

$C_T$  : couple de torsion,

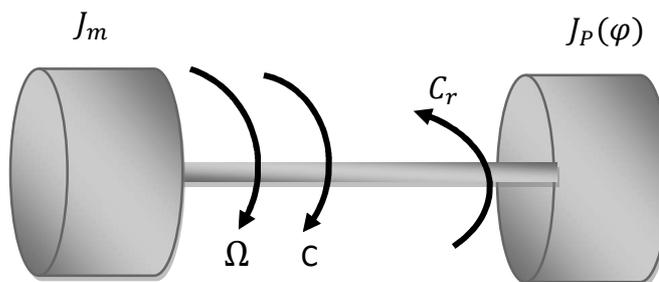
$K$  : coefficient d'élasticité,

$f_1, f_2$  : coefficient de frottement du moteur et de la pompe respectivement.

### II-2-2-2-Cas d'un accouplement rigide

Dans le cas d'un système où la charge est rigidement accouplée au moteur d'entraînement, on suppose que le couple résistant et le moment d'inertie de mécanisme sont fonction de l'angle de giration de l'arbre ( $\varphi$ ).

Le système à deux masses dans le cas d'un accouplement rigide, peut être représenté par la figure (II.3).



**Figure II.3** : Représentation d'un système à deux masses

Le moment d'inertie totale du système est égale à la somme des moments d'inertie des deux masses (moteur et pompe) est donné comme suit:

$$J(\varphi) = J_m + J_p(\varphi) \quad (\text{II-3})$$

L'équation dynamique du mouvement est donnée par :

$$J(\varphi) \frac{d\Omega}{dt} + \frac{\Omega^2}{2} \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} = C - C_r(\varphi) \quad (\text{II-4})$$

Dans la pratique on admet que le moment d'inertie ( $J$ ) est constant, donc  $\frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} = 0$

On aura, ainsi, l'équation générale de mouvement de rotation, suivante:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C - C_r \quad (\text{II-5})$$

### II-2-3-Calcul du couple résistant

Le couple résistant exercé par une pompe centrifuge varie en fonction du carré de la vitesse d'entraînement [31,37]. La pompe tourne à une vitesse de  $\Omega_p = 2900 \text{ tr/min}$ , avec une puissance de  $P_p = 6,3 \text{ KW}$ . Le couple  $C_r$  fournie par cette pompe est:

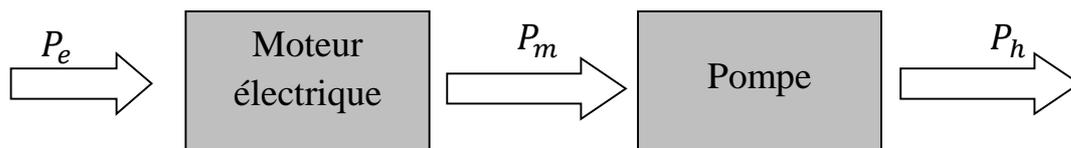
$$C_r = \frac{P_p}{\Omega_p} \quad (\text{II-6})$$

$$C_r = 20,74 \text{ N m}$$

Le groupe électropompe ne peut démarrer que si le couple moteur soit supérieur au couple résistant ( $C_m > C_r$ ) pendant toute la durée du démarrage. Le système se stabilisera à son régime établi au point de fonctionnement  $C_m = C_r$  [32].

### II-3-Calcul préliminaire de la puissance du moteur

Dans l'entraînement électrique d'une pompe centrifuge, le couple ou la puissance de charge est calculé à l'aide de formules établies à partir de l'expérience de leur conception [7]. Les informations nécessaires pour le calcul de la puissance, dans le cas d'une pompe centrifuge, sont : le débit massique, la hauteur d'élévation, le poids spécifique du liquide transporté et le rendement mécanique.



**Figure II.4** : répartition de puissance dans un groupe électropompe.

$P_e, P_m, P_h$  sont respectivement la puissance électrique absorbé par le moteur, la puissance mécanique au niveau de l'arbre et la puissance hydraulique fournie par la pompe.

La puissance absorbée  $P_m$  (en kW ou en W) par une pompe est la puissance mécanique au niveau de l'arbre ou de l'accouplement de la pompe. Cette puissance peut être déterminée en utilisant l'une des deux formules suivantes [33, 38, 39] :

$$P_m = \frac{\rho g Q H}{1000 \eta} \quad (\text{en KW}), \quad \text{avec } Q \text{ débit refoulé (m}^3/\text{s}). \quad (\text{II-7})$$

$$P_m = \frac{\rho Q H}{367 \eta} \quad (\text{en W}), \quad \text{avec } Q \text{ débit refoulé (m}^3/\text{h}). \quad (\text{II-8})$$

$P_m$  : puissance mécanique fournie par le moteur,

$\rho$  : masse volumique de l'eau en  $\text{kg/m}^3$ ,

$g$  : accélération de pesanteur =  $9,81\text{m/s}$ ,

$H$  : hauteur manométrique totale en m,

$\eta$  : rendement de la pompe.

Une pompe est caractérisée par son point de fonctionnement avec le réseau d'eau. Etant donné la caractéristique de la pompe multicellulaire, qui tourne à une vitesse de **2900tr/min** et fournit une puissance ( **$p=6,3 \text{ kW}$** ), les données correspond au point de fonctionnement de cette pompe avec le réseau d'eau sont :

- pour un débit  **$Q=90 \text{ m}^3/\text{h}$** , la hauteur manométrique correspondante est :  **$H=20 \text{ m}$** .

En pratique, on applique, lors de la détermination de la puissance du moteur, des coefficients de sécurités indiqués par l'utilisateur ou par des normes techniques [33, 39].

La puissance du moteur d'entraînement est :

$$P_m = \frac{\rho g Q H k_r}{1000 \eta} \quad (\text{II-9})$$

$k_r = 1,25$  et représente le coefficient de réserve.

### II-3-1-Construction du diagramme de charge et précision de la puissance du moteur

Les courbes caractéristiques d'une même pompe varient avec les vitesses de rotation  $N$ , selon la loi de similitude (loi d'affinité) [33, 39, 40]. Connaissant les performances d'une pompe centrifuge (débit  $Q_1$ , la hauteur manométrique totale  $H_1$  et la puissance  $P_1$ ) pour une vitesse  $N_1$  : les lois de similitude permettent de déterminer les performances ( $Q_2$ ,  $H_2$  et  $P_2$ ) pour une vitesse  $N_2$  en utilisant les relations suivantes (loi de similitude):

- Le débit est proportionnel à la vitesse :  $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}$
- La hauteur manométrique totale est proportionnelle au carré de la vitesse :  

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$
- La puissance de la pompe est proportionnelle au cube de la vitesse :  $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$

#### II-3-1-1-Diagramme de vitesse de la pompe

En se basant sur l'histogramme de la demande de consommation en eau chaude donné sur la figure (II-3), et sur la première loi de similitude, on peut construire le diagramme de

vitesse de la pompe : 
$$N_2 = \left(\frac{N_1}{Q_1}\right) Q_2 = K_q Q_2 \quad (\text{II-10})$$

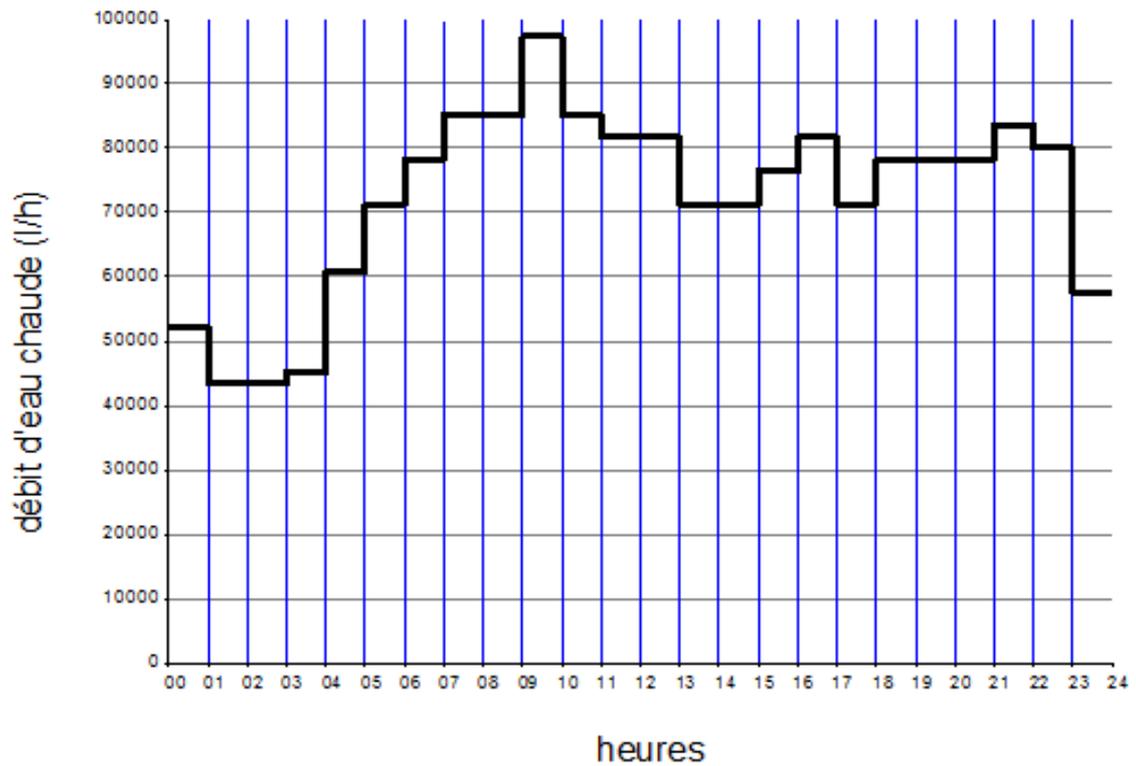
avec  $K_q$  coefficient de proportionnalité

D'après les caractéristiques données de la pompe utilisée, on obtient :

$$kq = \frac{2900}{25} = 116 \left(\frac{\text{tr/min}}{\text{l/s}}\right)$$

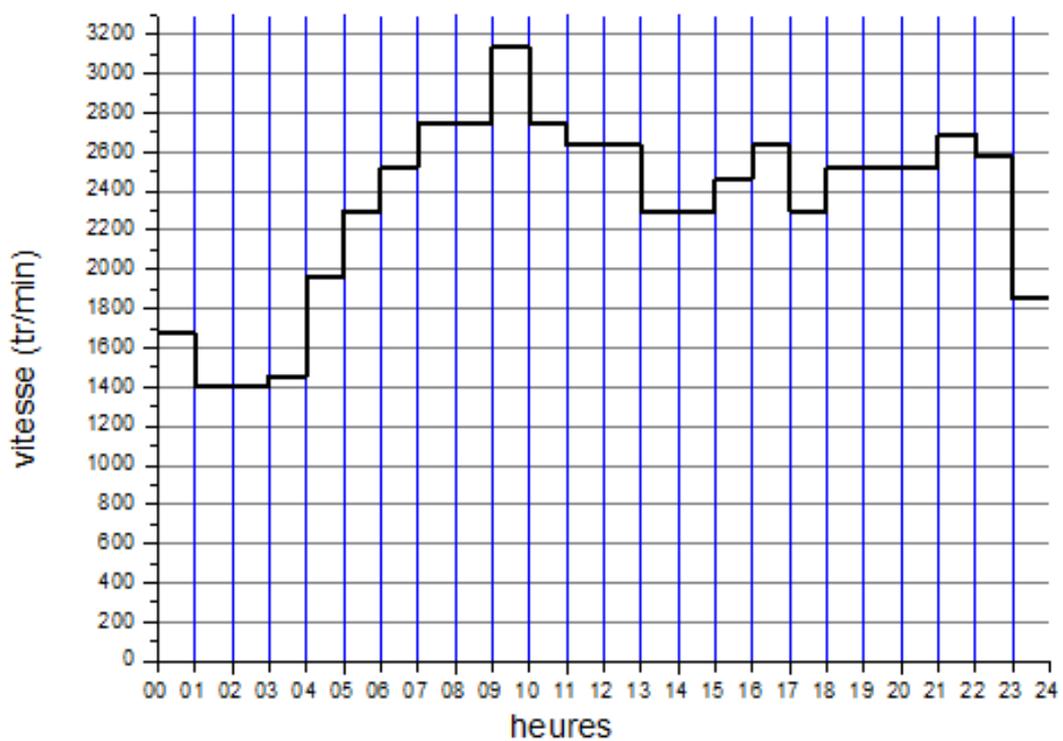
On aura ainsi :

$$N_2 = 116 Q_2 \quad (\text{II-11})$$



**Figure II.5:** Histogramme de débit journalier d'eau chaude consommée.

Le diagramme de vitesse correspondant au débit par heure est représenté sur la figure (II-6) :



**Figure II.6 :** Diagramme de vitesse de la pompe.

### II-3-1-2-Diagramme de couple de la pompe

Pour construire le diagramme du couple, on applique la formule suivante:

$$P_p = C_p \Omega_p \quad \Rightarrow \quad C_p = \frac{P_p}{\Omega_p} \quad (\text{II-12})$$

avec:

$P_p$ : puissance de la pompe en (w),

$C_p$  : couple exercé par la pompe (N.m),

$\Omega_p$ : vitesse de rotation de la pompe (rd/s).

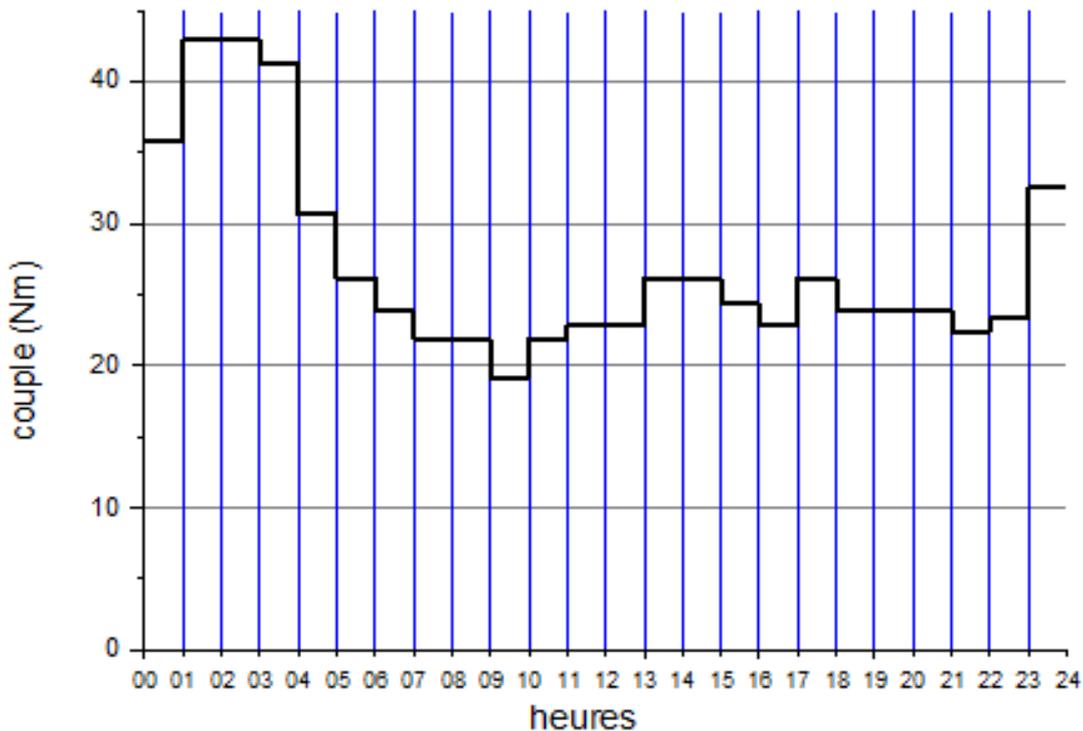


Figure II.7 : Diagramme de couple de la pompe.

### II-3-1-3-Diagramme de vitesse du moteur

Le couple de la pompe en fonction de la vitesse relative est défini comme suit:

$$C_p = c_0 + 0,95 c_p (\Omega^*)^2 \quad (\text{II-13})$$

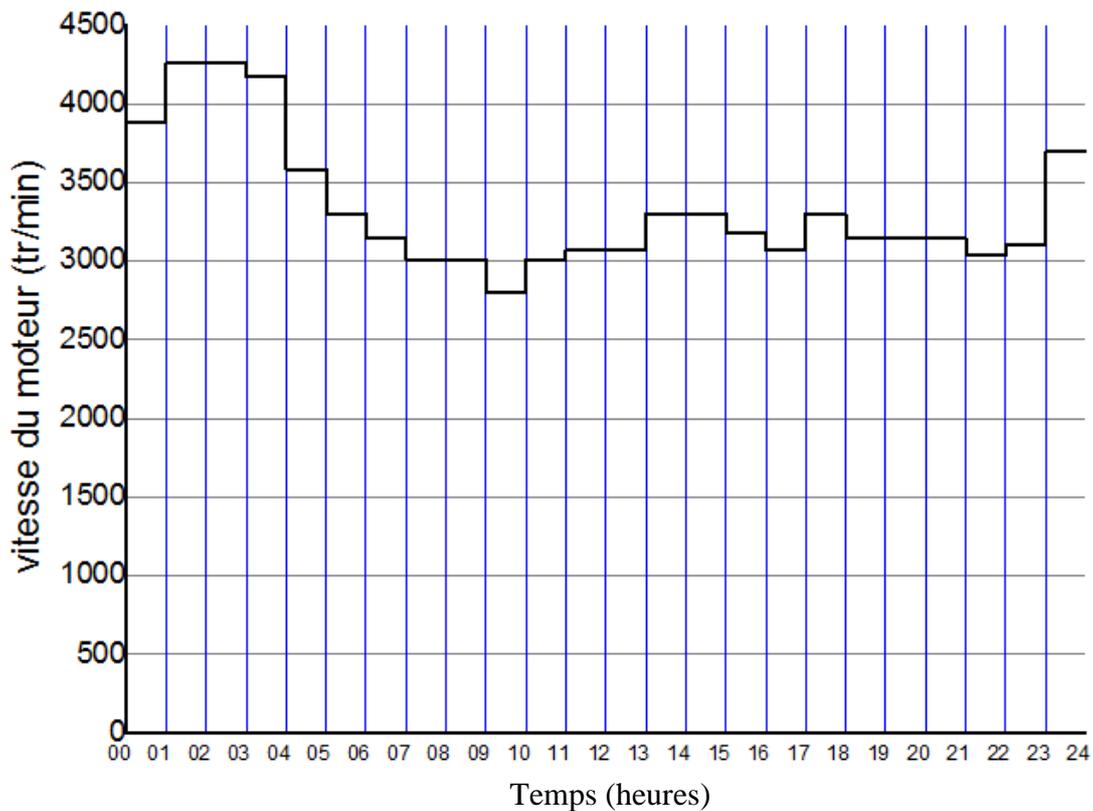
$c_0$  : couple déterminé par les forces de friction dans le mécanisme, on le prend égal à 5% du couple nominal de la pompe,

$C_p$  : couple nominal de la pompe,

$\Omega^* = \frac{\Omega}{\Omega_n}$  : vitesse relative du moteur,

$\Omega_n$  : vitesse nominale.

En se basant sur la relation (II-13), on peut construire le diagramme de la vitesse du moteur d'entraînement représenté sur la figure (II.8).



**Figure II.8** : Diagramme de vitesse du moteur.

#### II-3-1-4-Diagramme de couple du moteur

Le couple fournit par le moteur est donné par la formule suivante :

$$C_m = \frac{P_m}{\Omega} \quad (\text{II-14})$$

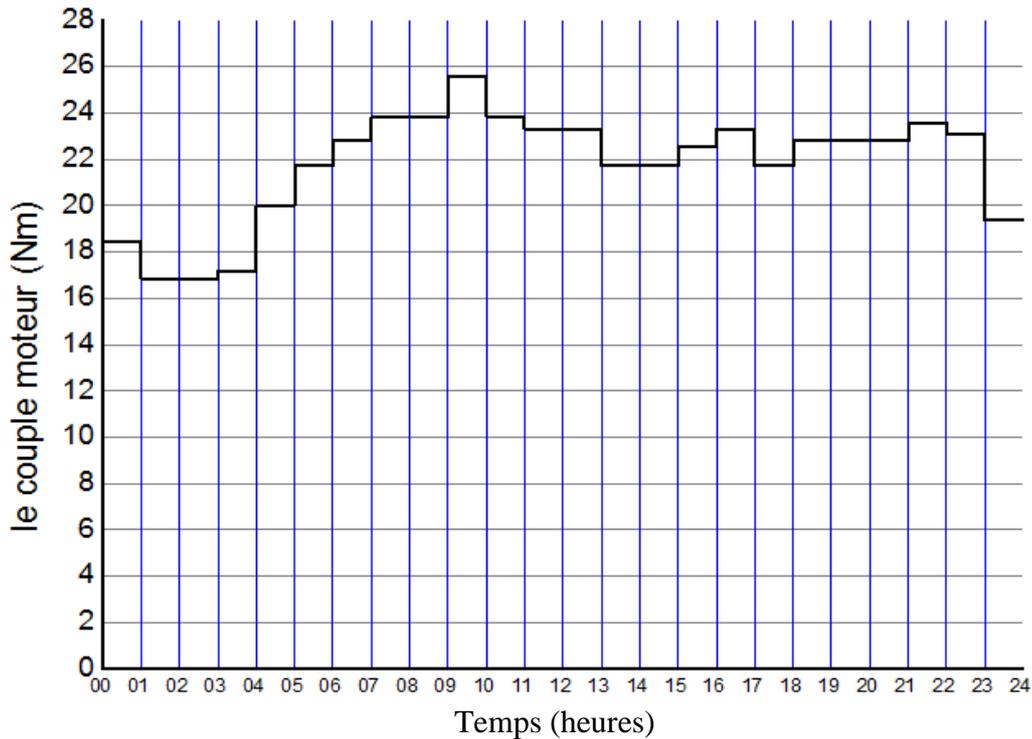
avec :

$C_m$  : le couple électromagnétique du moteur en (Nm),

$P_m$  : la puissance du moteur en (W),

$\Omega$  : vitesse du moteur en (rd/s).

Le diagramme de couple du moteur est représenté sur la figure (II.9) :



**Figure II.9:** Diagramme de couple moteur.

- Les diagrammes de vitesse et du couple, ont été tracés à l'aide d'un logiciel de calcul « **ORIGINE** » (version 9).

#### II-4-Contrôle du moteur en capacité de surcharge et d'échauffement

La surcharge d'un moteur se manifeste par une augmentation du courant absorbé et par des effets thermiques, elle est provoquée par une augmentation du couple résistant ou par une baisse de la tension du réseau [41]. En effet, l'augmentation du courant consommé par le moteur engendre un échauffement qui réduit sa durée de vie et peut lui être fatal à plus ou moins long terme. Toutefois, le nombre de démarrages et le nombre de freinages par unité de temps ont une incidence majeure sur l'échauffement des moteurs. La norme CEI 60034-1 (caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement) définit des services types qui permettent de calculer une image thermique et de dimensionner les moteurs en fonction de l'utilisation prévue [42].

Dans un régime variable, on est amené à établir une équivalence thermique avec un régime continu. On peut passer par un calcul de puissance thermique équivalente, ou par un

calcul du couple équivalent thermique  $C_{th}$ . On vérifie ensuite que le couple nominal du moteur est supérieur à ce couple équivalent thermique [32].

$$C_{th} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C^2(t) dt} \quad (II-15)$$

$C_{th}$  : couple équivalent thermique en N.m,

$C(t)$  : couple moteur variable (N.m).

Le couple équivalent thermique peut être calculé, sur une période bien identifiée, comme suit :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\sum_1^n C_i^2 t_i}{\sum_1^n t_i}} \quad (II-16)$$

$C_i$  : couple moteur variable (N.m),

$\sum_1^n t_i$  : période de fonctionnement du moteur.

D'après le diagramme du couple moteur tracé sur la figure (II-9), on calcule le couple équivalent thermique du moteur pour une période du temps de 24 heures :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\sum_1^{24} C_i^2 t_i}{\sum_1^{24} t_i}} \quad (II-17)$$

$$C_{th} = 21,77 \text{ N m}$$

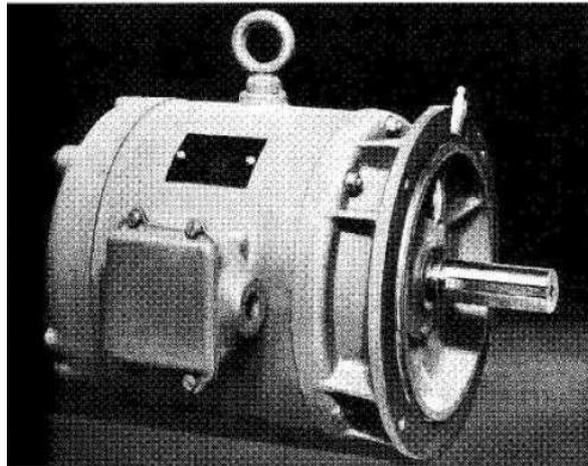
Ce calcul confirme que le couple nominal ( $C_m = 24,51 \text{ N m}$ ) est supérieur au couple équivalent thermique. En se basant sur le calcul préliminaire de la puissance et le calcul de contrôle du moteur en capacité de surcharge et échauffement, la puissance du moteur la plus proche dans la gamme normalisée est de **7,5 kW**. Les paramètres du moteur choisi selon le cahier de charge sont donnés en ANNEXE (A).

## II-5-Description des différents types de moteurs utilisés dans les stations de pompage d'eau chaude

Les moteurs à courant alternatif, notamment les moteurs à cage d'écureuil, sont les plus répandus dans les applications industrielles. Cependant, dans les stations de pompage d'eau, depuis l'évolution de l'électronique de puissance et des nouvelles techniques de commande des machines électriques, les pompes à moteur asynchrone triphasé à cage est la solution presque générale [11]. Lorsqu'on veut utiliser un moteur asynchrone triphasé pour

une application particulière, on se rend compte que plusieurs types de moteurs remplissent les exigences de la charge. Il faut donc faire un choix. Le problème est généralement simplifié du fait que le fabricant du tour, du ventilateur, de la pompe, etc, indique la catégorie de moteur convenant le mieux à la charge à entraîner [43].

- **Moteurs blindés (Totally enclosed):** Ils comportent une enveloppe empêchant toute communication directe entre l'intérieur du moteur et le milieu ambiant. Ils sont destinés aux locaux très humides ou très poussiéreux [43]. On distingue deux types :
- **Moteurs blindés sans ventilateur (Totally enclosed, non-ventilated) :** Ces moteurs sont habituellement de faible puissance ; l'évacuation de la chaleur s'y fait difficilement, car ils ne comportent ni ventilation intérieure, ni ventilation extérieure. On leur permet un échauffement par résistance de 65 °C, 85 °C, 110 °C ou 130 °C selon leur mode d'isolation.



**Figure II.10 :** Moteur blindé pour pompe centrifuge

- **Moteurs blindés avec ventilateur extérieur (Totally enclosed, fan-cooled).** Le refroidissement des moteurs fermés de moyenne et grande puissances. Servant dans les conditions défavorables, est assuré par une ventilation extérieure forcée ; il suffit de souffler de l'air entre la carcasse du moteur et une seconde enveloppe concentrique. Leur échauffement par résistance peut être de 60 °C, 80 °C, 105 °C ou 125 °C selon la classe d'isolation utilisée.

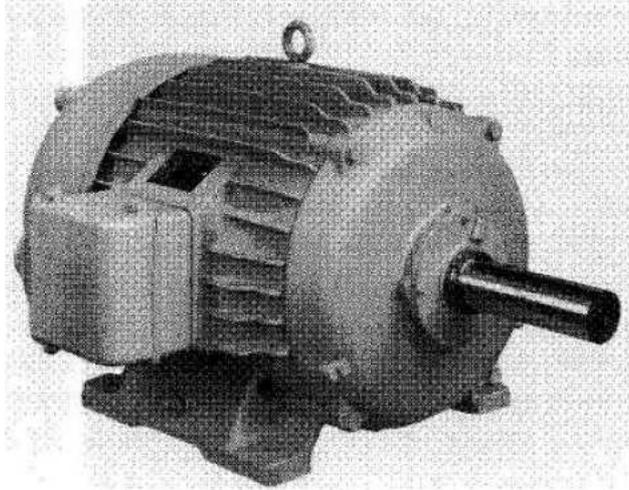


Figure II.11 : Moteur blindé avec ventilateur extérieur.

### II-5-1-Problème d'échauffement

Les machines électriques sont très sensibles aux élévations de température en particulier à cause de la fragilité de leurs enroulements. Il est donc nécessaire de déterminer correctement la température des différentes parties qui les constituent [44].

Le tableau suivant donne l'échauffement admis dans les différents organes de machines tournantes, pour les différentes classes d'isolation et une température ambiante de 40°C dans le cas de l'air, de 25°C dans le cas de l'eau [45] :

Classe	A	E	B	F	H
Enroulements	50 à 65°C	65 à 80°C	70 à 90°C	85 à 110°C	105 à 135°C
Collecteurs et bagues	60°C	75°C	80°C	90°C	100°C
Tôles	60°C	75°C	80°C	100°C	125°C
Paliers lisses	45°C	45°C	45°C		
Paliers à roulements	60°C	60°C	60°C		

La classe d'isolation détermine l'échauffement normal d'un moteur à une température ambiante de 40°C. Tout dépassement de la température limite de fonctionnement, conduit à une réduction de la durée de vie par vieillissement prématuré des isolants [41]. L'échauffement est dû principalement aux pertes par effet joule, pertes par hystérésis, par courant de Foucault, frottements,... Il en résulte donc un échauffement important qu'il faut limiter par des systèmes de protection (contre les surcharges), et par refroidissement qui peut être direct ou indirect [45] :

**a- Refroidissement direct** (moteurs ouverts ou semi fermés): l'air est en contact direct avec les organes de la machine. L'air est évacué soit naturellement, soit à l'aide de ventilateur.

**b- Refroidissement indirect** par un fluide intermédiaire; ce fluide circule en circuit fermé à l'intérieur de la machine (moteur fermé) sous l'action de ventilateur. L'échange de chaleur entre ce fluide intermédiaire et le fluide de refroidissement (air ou eau) peut s'effectuer :

- Soit au travers de la paroi de la machine, munie de nervures ou de tubulures, c'est le cas des moteurs fermés. Dans ce cas, le fluide intermédiaire et le fluide de refroidissement étant tous les deux de l'air.
- Soit par l'envoi du fluide intermédiaire dans un réfrigérant, le fluide intermédiaire, dans ce cas, est l'air ou l'hydrogène, et le fluide de refroidissement est l'air ou l'eau de réfrigérant.

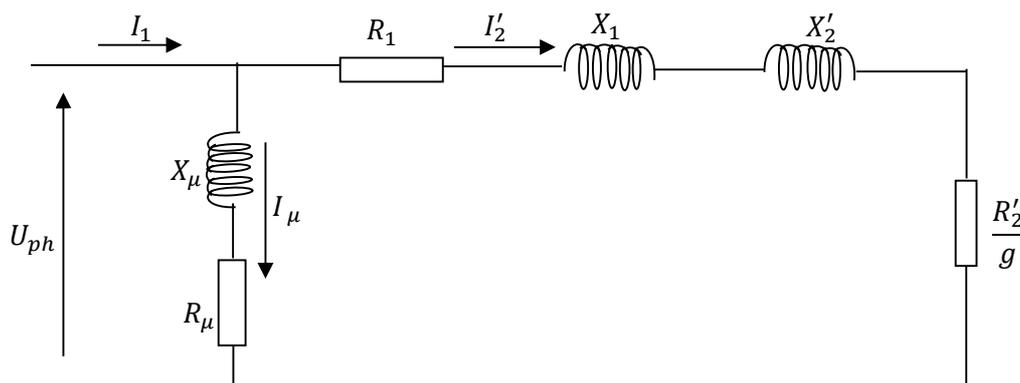
## II-6-Calcul des paramètres du schéma équivalent et construction de la caractéristique mécanique naturelle

### II-6-1-Calcul des paramètres du schéma équivalent

Afin de caractériser le fonctionnement d'une machine asynchrone, diverses possibilités sont offertes dont la plus courante est la modélisation par schéma équivalent. La détermination des paramètres du schéma équivalent repose sur quelques hypothèses :

On suppose que la machine asynchrone fonctionne en régime équilibré, dans ce cas, les trois phases sont équivalentes. Il est nécessaire de substituer le régime de fonctionnement de la machine tournante à un régime équivalent au cours duquel le rotor reste freiné.

Pour un glissement  $g=1$ , donc la vitesse est nulle; la machine asynchrone se comporte alors comme un transformateur dont le secondaire est court-circuité [46].



**Figure II.12:** Schéma équivalent par phase d'une machine asynchrone.

La liaison entre les deux circuits (statorique et rotorique) s'effectue à travers le champ électromagnétique, la mise en liaison des paramètres rotorique est obtenue par le rapport [47] :

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx 0.95 \frac{U_{ph}}{E_{2k}}$$

$E_1, E_2, et E_{2k}$  : Les enroulements statorique, rotorique et à rotor immobile.

$U_{ph}$  : la tension de phase nominale.

### II-6-1-1-Courant rotorique

A partir du schéma équivalent (fig. II.12) cherchons l'expression du courant rotorique:

$$I_2' = \frac{U_{ph}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{g}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{U_{ph}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{g}\right)^2 + X_c^2}} \quad (\text{II-18})$$

Avec :

$X_c$  : réactance inductive du court circuit.

$R_1, R_2'$  : sont respectivement les résistances actives des enroulements statorique et rotorique de la machine asynchrone.

$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$  : glissement,

$\Omega_s, \Omega_r$  : vitesse angulaire du champ statorique et du rotor, respectivement.

### II-6-1-2-Bilant de puissances

- Dans les schémas monophasés équivalents, la puissance électromagnétique transmise à travers l'entrefer est donnés par :

$$P_e = 3 \frac{R_2'}{g} I_2'^2 \quad (\text{II-19})$$

- Les pertes par effet Joule au rotor s'exprime donc en fonction de cette puissance transmise et du glissement, comme suit :

$$p_{jr} = g P_e = 3 R_2' I_2'^2 \quad (\text{II-20})$$

- La puissance mécanique du moteur (pertes ferromagnétique négligeables) est donnée par :

$$P_{méc} = P_e - p_{jr} \Rightarrow P_{méc} = 3 \frac{R_2' (1-g)}{g} I_2'^2 \quad (\text{II-21})$$

Lorsque le moteur est branché sur le réseau, le glissement en fonctionnement normal est faible. La fréquence  $f_r = g f_s$  des courants rotoriques est beaucoup plus petite que celle des courants statoriques  $f_s$ , et les pertes ferromagnétiques au rotor sont alors négligeables. Par contre, quand le moteur est alimenté par un convertisseur électronique ces pertes interviennent beaucoup plus [48].

### II-6-1-3-Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique d'une machine asynchrone n'est créé que par la branche droite du schéma équivalent [49].

Du schéma (II-10) nous allons évaluer l'expression du couple sachant que la puissance

mécanique est donnée par :  $P_{méc} = 3 \frac{R'_2(1-g)}{g} I_2'^2$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Comme : } P_{méc} = C \omega \\ \omega = (1-g) \omega_{0n} \end{array} \right\} \Rightarrow P_{méc} = C (1-g) \omega_{0n}$$

On aura :

$$C = 3 \frac{R'_2(1-g)}{(1-g) \omega_{0n} g} I_2'^2 \quad (\text{II-22})$$

Nous aboutissons finalement à l'expression du couple électromagnétique suivante :

$$C = 3 \frac{U_{ph}^2}{g \omega_{0n}} \frac{R'_2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{g}\right)^2 + X_c^2} \quad (\text{II-23})$$

Le couple au démarrage, pour un glissement égal à un ( $g=1$ ), est donné par la relation (II-23) :

$$C_d = 3 \frac{U_{ph}^2}{\omega_{0n}} \frac{R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + X_c^2} \quad (\text{II-24})$$

La valeur du couple maximal et le glissement critique peuvent être déterminés en calculant la dérivée du couple par rapport au glissement, cette dérivée sera nulle pour un glissement «  $g_{cr}$  »

appelé glissement critique :  $g_{cr} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_c^2}}$  (II-25)

Le couple critique sera alors donné par la relation (II-26) :

$$C_{cr} = \frac{3 U_{ph}^2}{2 \omega_{0n} \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_c^2}\right)} \quad (\text{II-26})$$

Les calculs des paramètres du schéma équivalent se fait, en se basant sur les données de catalogue du moteur choisi (les calculs sont donnés en annexe -A):

Paramètres	Identification
Impédance du court circuit	$Z_c = \frac{U_{ph}}{\lambda_1 I_n}$
Facteur de puissance au démarrage	$\cos\varphi_d = \cos\varphi_n \left[ \frac{\lambda_d \eta_n}{\lambda_1(1 - g_n)} + \gamma_{st} (1 - \eta_n) \right]$
Résistance active du court circuit	$R_c = Z_c \cos\varphi_d$
Réactance du court circuit	$X_c = \sqrt{Z_c^2 - R_c^2}$
Courant à vide	$I_0 = I_n \left( \sin\varphi_n - \frac{g_n}{g_{cr}} \cos\varphi_n \right)$
Courant rotorique ramené au circuit statorique	$I'_2 = \sqrt{\frac{C \omega_{0n} g}{3 R'_2}}$
Pertes d'aimantation	$\Delta P_{st} = 0,02 \frac{P_n}{\eta_n}$
Résistance active de la constante d'aimantation	$R_\mu = \frac{\Delta P_{st}}{3 I_0^2}$
Constante de temps électromagnétique du moteur	$T_e = \frac{1}{2 \pi f g_{cr}}$

Etant donné les constantes suivantes:

$\gamma_{st} = 0,3$  : est le rapport de pertes dans l'enroulement statorique totales à charge nominale ;

$$\lambda_1 = \frac{I_d}{I_n} = 7,5$$

$$\lambda_d = \frac{C_d}{C_n} = 2 : \text{Facteur de surcharge.}$$

#### II-6-1-4-Courant nominal

Le courant nominal est donné par la formule suivante :

$$I_n = \frac{P_n}{3 U_{ph} \eta_n \cos\varphi_n} \quad (\text{II-27})$$

## II-6-2-Caractéristique mécanique naturelle du moteur asynchrone

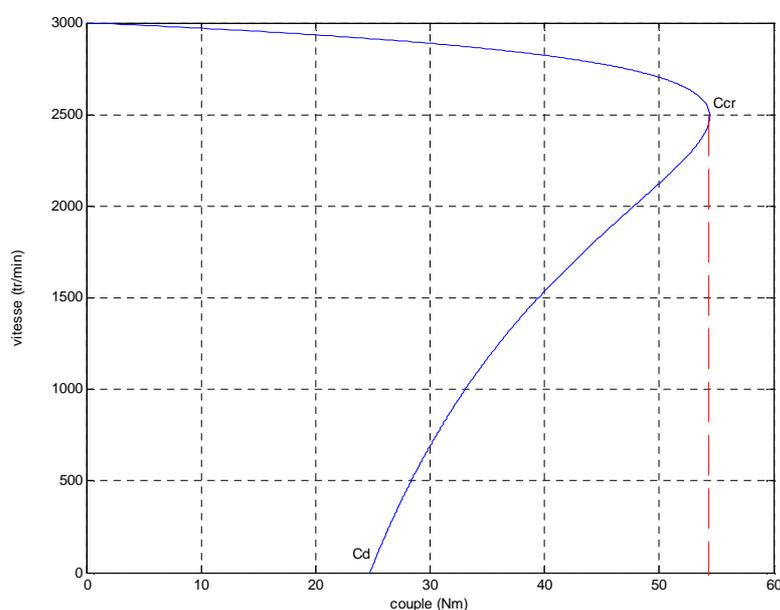
Pour évaluer les propriétés du moteur asynchrone on se sert de sa caractéristique mécanique (la vitesse de rotation du rotor en fonction du couple électromagnétique). On établit une formule très utilisée, et qui ne fait pas appel à la connaissance des impédances internes, mais qui exige la connaissance du glissement critique et du couple critique. Cette formule, appelée formule de KLAUSS [47,50], s'exprime par la relation (II-28) :

$$C = \frac{2 C_{cr} (1 + a |g_{cr}|)}{\frac{g}{|g_{cr}|} + \frac{|g_{cr}|}{g} + 2 a |g_{cr}|} \quad (\text{II-28})$$

Où :  $a = R_1/R_2'$  : est le coefficient qui tient compte du rapport des résistances actives des enroulements du stator et du rotor de la machine asynchrone.

Les caractéristiques des figures (II.13), (II.14) et (II.15) ont été tracées numériquement (par simulation sous MATLAB) en exploitant directement les équations analytiques correspondantes.

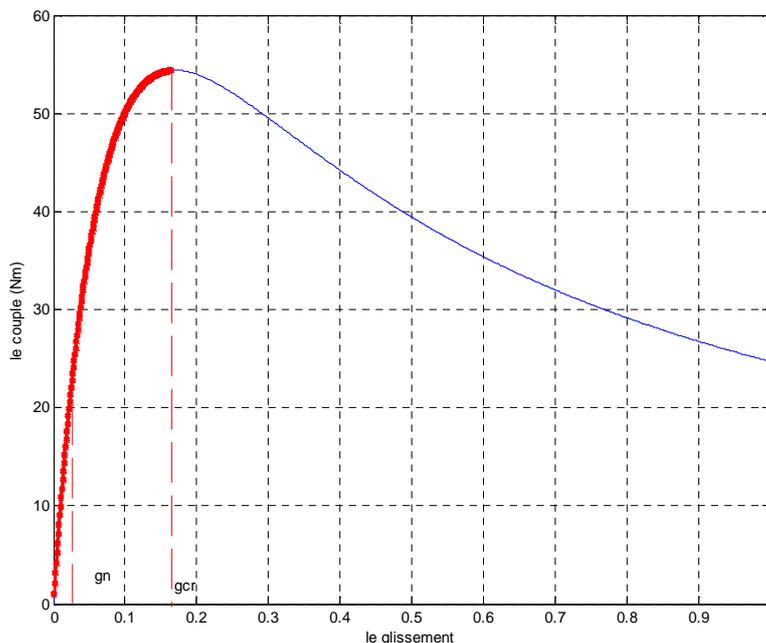
La figure (II-13) représente la caractéristique mécanique naturelle du moteur asynchrone.



**Figure II.13** : caractéristique mécanique naturelle du moteur asynchrone.

La caractéristique mécanique naturelle représente le couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation du moteur. De cette caractéristique, on constate qu'à une vitesse de rotation nulle, le moteur développe un couple ( $C_d$ ) appelé « couple de démarrage », lorsque le moteur atteint sa vitesse de synchronisme, le couple est nul. Cependant le moteur décroche quand le couple dépasse son couple critique ( $C_{cr}$ ).

### II-6-2-1-Caractéristique du couple en fonction du glissement



**Figure II.14** : représentation du couple en fonction du glissement.

Un fonctionnement stable doit satisfaire la condition suivante :

$$\frac{d(C_{em} - C_r)}{d\Omega_r} < 0$$

La caractéristique du couple en fonction du glissement présente deux parties distinctes [50] :

$$g < g_{cr} \Rightarrow \frac{dC_{em}}{dg} > 0 \Rightarrow \frac{dC_{em}}{d\Omega_r} < 0 \Rightarrow \text{Le fonctionnement est stable.}$$

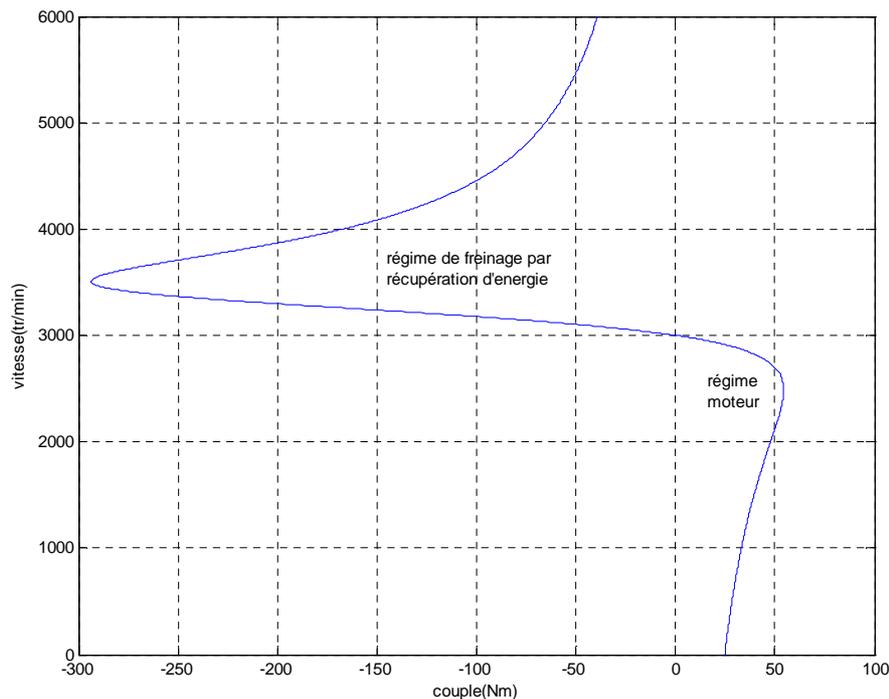
$$g > g_{cr} \Rightarrow \frac{dC_{em}}{dg} < 0 \Rightarrow \frac{dC_{em}}{d\Omega_r} > 0 \Rightarrow \text{Le fonctionnement est instable.}$$

On définit le coefficient de stabilité par :  $\gamma_s = C_{max}/C_n$

Avec :  $1,6 < \gamma_s < 2,5$

Afin d'avoir de bonnes performances mécaniques, il est préférable de travailler dans la zone linéaire. Le glissement idéal doit se situer au plus proche de la partie linéaire de la courbe du couple-glissement.

### II-6-2-2 Caractéristique du moteur dans les deux régimes de fonctionnement



**Figure II.15** : Représentation de la vitesse en fonction du couple pour les deux régimes de fonctionnement.

Sur la figure (II.15), on représente la caractéristique mécanique du moteur asynchrone pour deux régimes de fonctionnement :

- régime moteur : le couple et la vitesse de rotation tournent dans le même sens et prennent les valeurs positives, la vitesse du moteur varie entre sa vitesse nulle et la vitesse de synchronisme ( $0 < \omega < \omega_0$ ) et le glissement varie entre zéros et un ( $0 < g < 1$ ).
- Régime de freinage par récupération d'énergie : dans ce cas, le couple change le sens de rotation et le glissement donc est négatif ( $g < 0$ ), tandis que la vitesse de rotation reste positive. Le moteur est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme. La machine fonctionne en générateur asynchrone, et l'énergie est renvoyée vers le réseau. Il s'agit d'un fonctionnement en récupération.

### II-6-2-3- Caractéristique du groupe électropompe

Le couple de la pompe ( $C_p$ ) transmis par l'accouplement d'arbre dépend directement de la puissance et de la vitesse de rotation du moteur.

$$C_p = C_0 + 0,95 C_{pn} (\Omega^*)^2 \Leftrightarrow C_p = C_0 + K \Omega^2$$

avec :

$C_0$  : couple déterminé par les forces de friction dans le mécanisme, on le prend égal à 5% du couple nominal de la pompe,

$C_{pn}$  : couple nominal de la pompe,

$(\Omega^*) = \frac{\Omega}{\Omega_n}$  : vitesse relative du moteur,

$\Omega_n = \omega_n/p$ ,

$\omega_n = 305,99 \text{ rd/s}$ ,

$\omega_n$  : vitesse nominale,

$p$  : nombre de paires de pôle,

$C_0 = 0,05 \times 20,75 = 1,0375 \text{ Nm}$ .

$K = 0,95 \times C_{pn} \times \frac{1}{\omega_n^2} = 2,1 \times 10^{-4}$ .

L'équation générale de la pompe est, donc, donnée par la relation suivante :

$$C_p = 1,0375 + 2,1 \times 10^{-4} \times \Omega^2$$

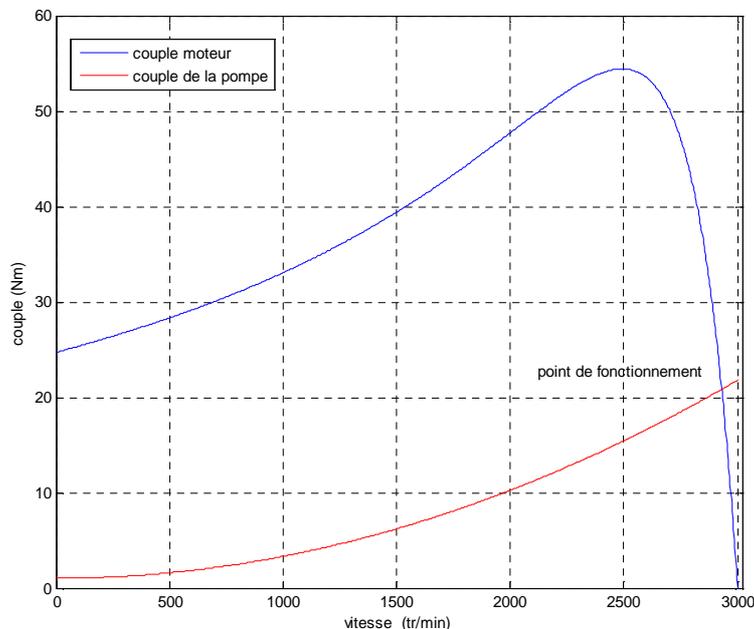
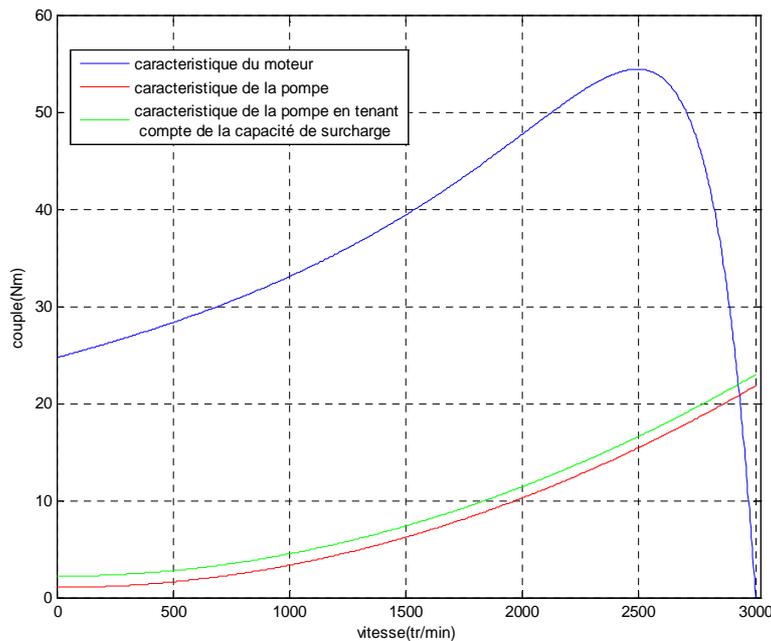


Figure II.16 : Caractéristique du groupe électropompe.

L'évolution du couple ( $C_p$ ) est représentée sur la figure II.16. Elle est pratiquement parabolique en fonction de la vitesse de rotation. On trouve le point de fonctionnement du groupe électropompe qui représente le point d'intersection entre la caractéristique du couple moteur (caractéristique naturelle) et celle de la pompe.

Le point de fonctionnement est :  $f(C_p; \Omega) = (20,86 Nm; 2930 tr/min)$



**Figure II.17** : caractéristique du groupe électropompe en tenant compte de la capacité de surcharge.

La figure (II.17) représente la caractéristique du groupe électropompe en tenant compte de la capacité de surcharge de la pompe de 2,2 Nm. Le nouveau point de fonctionnement :

$$f_s(C_p; \Omega) = (21,95 Nm; 2925,45 tr/min)$$

Au démarrage de la pompe centrifuge, le couple fourni par le moteur asynchrone doit être supérieur afin que le rotor puisse être accéléré jusqu'à la vitesse nominale. Ce couple moteur a un effet direct sur l'intensité absorbée du moteur et cette dernière sur l'échauffement du bobinage du moteur. Il faut donc éviter, dans la mesure du possible, des échauffements inadmissibles du moteur en limitant le temps du démarrage et/ou l'intensité [33].

## **II-7-Conclusion**

Nous avons consacré ce chapitre au choix préliminaire du système d'entraînement, au calcul de la puissance du moteur et au calcul des paramètres du schéma équivalent. La vérification des critères de surcharge était indispensable afin de valider ce choix et d'assurer un fonctionnement normal au système d'entraînement. Les caractéristiques mécaniques du groupe électropompe ont été tracées dans le but de déterminer le point de fonctionnement de ce dernier.

Le chapitre suivant sera réservé à la modélisation du moteur asynchrone et à la présentation des différents types de commande.

## Chapitre III

# **Modélisation et commande du moteur asynchrone à cage**

### III-1-Introduction

La modélisation des machines à courant alternatif repose principalement sur les travaux de G. Kron qui ont donné naissance à la notion de machine généralisée [51]. Le modèle de Park qui consiste à réduire la dimension du référentiel (du triphasé au biphasé) est un cas particulier de ce concept. Il est souvent utilisé pour la synthèse des lois de commande et des estimateurs.

Dans ce chapitre, nous présenterons le modèle mathématique triphasé de la machine asynchrone et de sa transformation dans le système biphasé. Les différentes stratégies de commande seront aussi traitées.

### III-2-Présentation du moteur asynchrone à cage

Le moteur asynchrone, dit encore d'induction, comporte deux armatures à champ tournant : l'une est fixe (le stator) et l'autre mobile (le rotor).

Le stator est constitué d'un circuit magnétique, comportant de multiples encoches à l'intérieur desquelles sont bobinées trois enroulements formant les enroulements statoriques. Ces enroulements sont reliés au réseau par l'intermédiaire de la plaque à bornes. Au centre de ce cylindre, on trouve le rotor de la machine dont le circuit magnétique est composé de tôles isolées entre elles pour empêcher la circulation de courants de Foucault. Le rotor est formé de barres en aluminium disposées en parallèle et court-circuitées aux extrémités par deux anneaux, constitues les enroulements rotoriques [52, 53]. L'arbre du moteur est solidaire du circuit rotorique et des paliers lui sont posés sur des roulements afin qu'il puisse tourner.

### III-3-Modélisation du moteur asynchrone à cage

La modélisation de la machine permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions des grandeurs électromécaniques, d'une part, et d'autre part pour l'élaboration des lois de commande. La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur les hypothèses traditionnelles suivantes :

- symétrie parfaite de construction;
- les armatures magnétiques du stator et du rotor sont toutes deux cylindriques concentriques, séparées par un entrefer constant et munies chacune d'un enroulement triphasé;
- répartition sinusoïdale, le long de l'entrefer, des champs magnétiques statorique et rotoriques
- le circuit magnétique est non saturé et à perméabilité magnétique constante;

- les pertes ferromagnétiques, l'effet de peau et l'effet des encoches ne sont pas pris en considération.
- Les enroulements du stator et du rotor sont à répartition sinusoïdale de sorte que les inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, sont des fonctions sinusoïdales de la position mécanique du rotor par rapport au stator

### III-3-1-Equations électriques

Les équations de tension dans le repère (a, b, c) :

- Au stator :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (\text{III-1})$$

- Au rotor :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} = 0 \quad (\text{III-2})$$

Avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

### III-3-2-Equations magnétiques

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{III-3})$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{III-4})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \text{ Matrice de bobinage au stator}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \text{ Matrice de bobinage au rotor.}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$M_{sr}$  : Inductance mutuelle maximale entre rotor et stator,

$\theta$  : angle électrique entre l'axe d'une phase statorique et celle du rotor.

### III-3-3-Equation mécanique

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_f \Omega = C_e - C_r \quad (\text{III-5})$$

$C_e$  : couple électromagnétique développé par le moteur,

$C_r$  : couple résistant,

$k_f$  : coefficient de frottement visqueux,

$\Omega$  : vitesse angulaire du moteur.

### III-3-4-Transformation de Park – référentiel (d,q)

Il s'agit d'une transformation des grandeurs alternatives d'un référentiel triphasé (a, b, c) à un référentiel diphasé (d, q) tournant avec le champ statorique. La machine asynchrone triphasée peut être transformée en une machine biphasée équivalente à l'aide de la transformation de Park [51]. La matrice de Park est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, aux tensions et aux flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-7})$$

Pour une machine avec neutre isolé, on néglige la composante homopolaire, ce qui donne :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-8})$$

Avec  $X = (X_d, X_q)$  peut être une tension, un courant ou un flux. L'angle  $\theta$  dépend de choix de référentiel.

La matrice inverse de Park est donnée par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III-9})$$

Cette matrice permet de passer du repère (dqo) au repère (abc).

### III-3-5-Equations électriques dans le référentiel (d,q)

En appliquant la transformation de Park aux équations (III-1) et (III-2), on aura le système d'équations suivant :

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \quad (\text{III-10})$$

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} + \omega_s \psi_{sq} \quad (\text{III-11})$$

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_r \psi_{rq} \quad (\text{III-12})$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_r \psi_{rd} \quad (\text{III-13})$$

On note :  $\omega_r = \omega_s - \omega$

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$  est la pulsation électrique des courants rotorique (rd/s),

$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  est la pulsation électrique des courants statorique (rd/s),

Avec  $\Omega = \omega/p$  est la vitesse angulaire de rotation.

### III-3-5-1-Equations des flux

$$\psi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \quad (\text{III-14})$$

$$\psi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \quad (\text{III-15})$$

$$\psi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \quad (\text{III-16})$$

$$\psi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \quad (\text{III-17})$$

$L_s = l_s - M_s$  est l'inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$  est l'inductance cyclique rotorique

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  est l'inductance mutuelle cyclique stator-rotor.

### III-3-5-1-Equation du couple électromagnétique

$$C_e = p(\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{III-18})$$

Cette équation peut aussi se mettre sous la forme :

$$C_e = p M (I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) \quad (\text{III-19})$$

### III-3-6-Modèles d'état de la machine asynchrone

Le modèle d'état de la machine asynchrone dans un référentiel liée au stator est donné par :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ I_{sd} \\ I_{sq} \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_s & 0 \\ \frac{1}{\sigma T_r L_s} & \frac{\omega_r}{\sigma L_s} & \frac{-1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_s} \right) & -\omega_r & 0 \\ \frac{-\omega_r}{\sigma L_s} & \frac{1}{\sigma T_r L_s} & \omega_r & \frac{-1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_s} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J} \left( \frac{p(C_e - C_r)}{\omega_r} - k_f \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ I_{sd} \\ I_{sq} \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} : \text{est le coefficient de dispersion,}$$

$T_s$  c'est la constante du temps statorique,

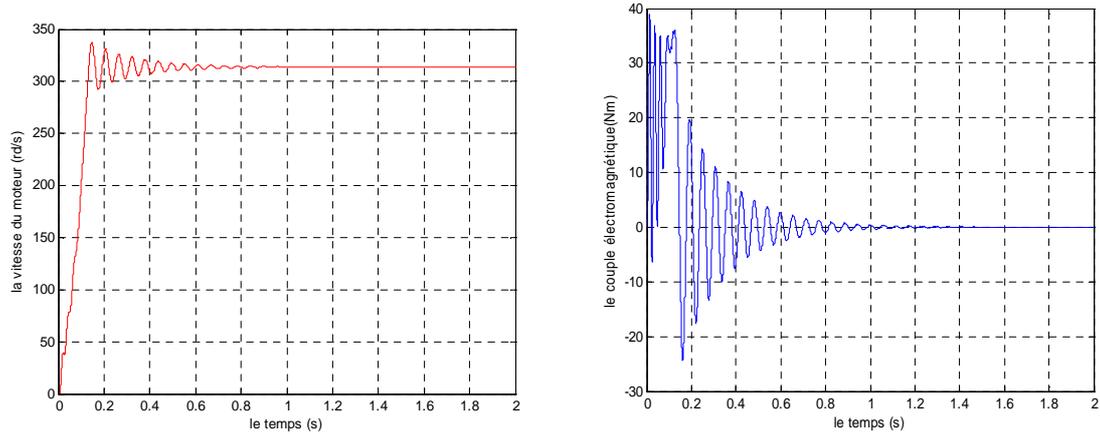
$T_r$  est la constante du temps rotorique.

Pour simuler le comportement dynamique de la machine asynchrone, on utilise ce modèle d'état.

### III-4- Résultats de simulation de la machine asynchrone couplée directement au réseau

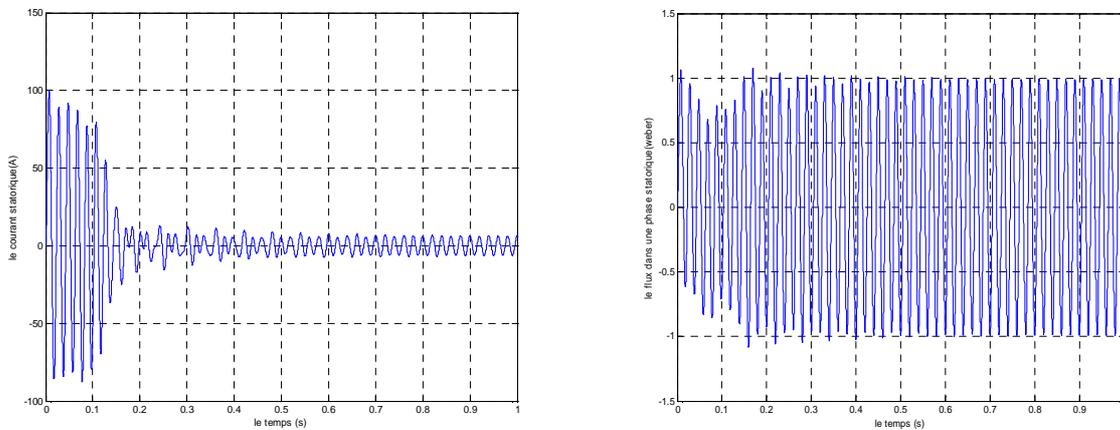
#### III-4-1- Résultats de simulation au démarrage à vide et en charge

**Démarrage à vide :** la figure (III-1) représente les résultats de simulation du moteur asynchrone étudié dans ce travail (les paramètres du moteur sont donnés en Annexe-A). Le moteur étant démarré à vide et alimenté directement par un réseau triphasé.



a-évolution de la vitesse en fonction du temps

b- comportement du couple électromagnétique



c- courant dans une phase statorique

d-flux d'une phase statorique

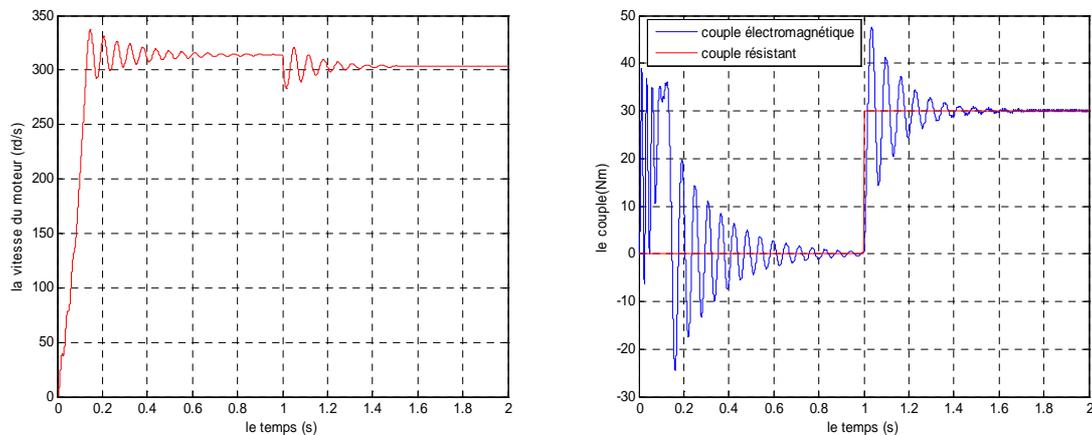
**Figure III.1 :** Résultats de simulation du moteur asynchrone à vide.

La figure (III.1) représente l'évolution de la vitesse de rotation du moteur, le couple électromagnétique développé, le courant dans une phase statorique et le flux statorique.

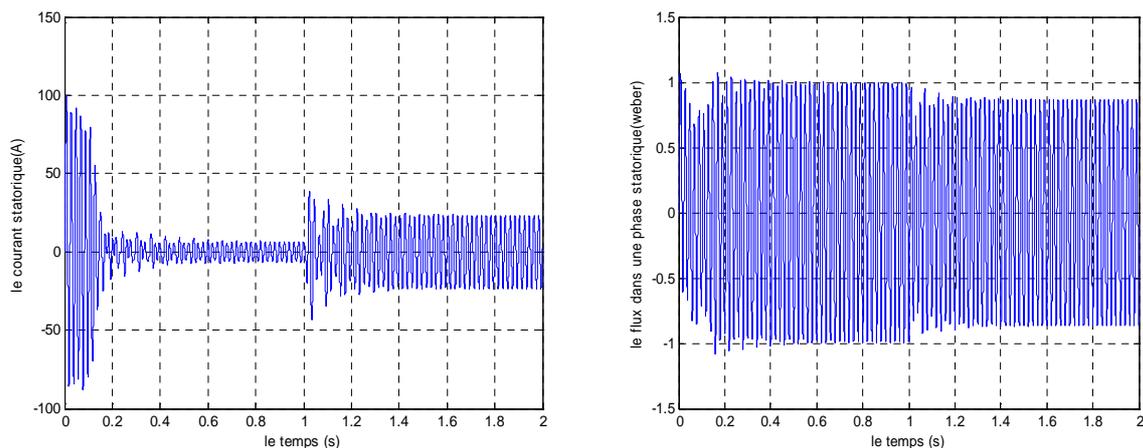
En régime transitoire, on remarque un accroissement presque linéaire de la vitesse avec une tendance à osciller en fin de ce régime, puis elle se stabilise à une vitesse très proche de

synchronisme (313,7rd/s) durant le régime permanent. Le comportement du couple électromagnétique développé par le moteur est représenté sur la figure (III-1-b). Le couple est fortement pulsatoire aux premiers instants de démarrage, il présente des oscillations importants qui dépassent 35 Nm, puis il se stabilise à une valeur presque nulle. Ces fortes oscillations du couple entraînent un bruit constaté lors du démarrage du moteur, ainsi que des pics de courant qui atteignent 80A au bout de quelques alternances pour donner lieu à une forme sinusoïdale d'amplitude constante au régime permanent (figure III-1-c).

➤ **Démarrage à vide suivi de l'application d'une charge  $C_r=30$  Nm.**



**Figure III.2:** évolution de la vitesse et du couple électromagnétique du moteur à vide suivi de l'application d'une charge.



**Figure III.3 :** forme du courant et du flux statorique.

La figure (III.2) représente l'évolution de la vitesse, en fonction du temps, ainsi que le comportement du couple électromagnétique, du moteur à vide, suivi de l'application d'une

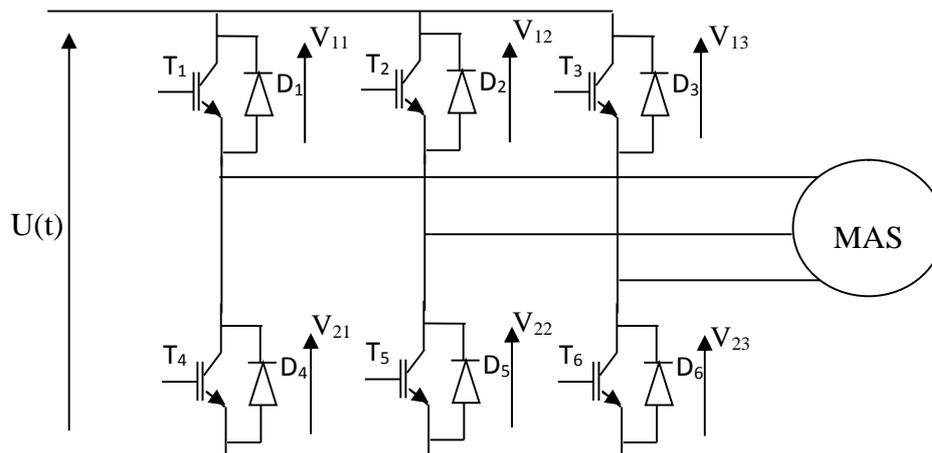
charge de 30Nm à l'instant  $t=1s$ . On remarque que le passage d'un régime à vide vers un régime en charge engendre quelques oscillations du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation. Cependant, l'application de la charge entraîne la diminution de la vitesse de rotation du moteur. Notons que le moteur développe un couple électromagnétique égale au couple résistant appliqué en régime établi.

Après l'application de la charge à  $t=1s$ , le courant et le flux statorique répondent parfaitement au changement de la consigne du couple résistant. En effet, le courant atteint une valeur de 23,4 A en charge après avoir passer par le régime à vide d'une valeur de 6,4 A.

### III-5-Modélisation de l'alimentation du moteur asynchrone

La modélisation de la machine asynchrone sous forme de représentation d'état fait apparaître les variables d'état nécessaires aux objectifs de commande ou d'observation. Cependant, pour une simulation correcte, il serait essentiel de prendre en considération les équations de l'onduleur, qui est un système à commutation, et de les faire intervenir dans la mise au point du modèle de la machine [54].

L'onduleur de tension triphasé, à deux niveaux, forme un pont triphasé constitué de trois bras, comme l'indique la figure (III-4).



**Figure III.4** : Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant un moteur asynchrone.

Les trois cellules de commutation, formant un onduleur triphasé, sont bidirectionnelles en courant et chaque groupe transistor-diode, assemblés en antiparallèle, forme un interrupteur bi-commandable pour former ainsi un bras de commutation [55].

Chaque interrupteur  $K_{ci}$  ( $c \in \{1, 2, 3\}$ ,  $i \in \{1, 2\}$ ), supposé idéal introduit une fonction de connexion  $f_{ci}$ .

Le courant  $i_{ci}$  qui le traverse et la tension  $V_{ci}$  à ses bornes ont respectivement pour expression :

$$\left. \begin{aligned} i_{ci} &= f_{ci} \cdot I_c \\ V_{ci} &= (1 - f_{ci}) V_c \end{aligned} \right\} \quad \text{(III-20)}$$

La fonction  $f_{ci}$  est définie comme suit :

$$f_{ci} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur est ouvert} \end{cases}$$

$I_c$  est le courant commuté,

$V_c$  est la tension commutée.

Chaque cellule est formée de deux interrupteurs. Comme la conduction est considérée toujours continue, à un instant donné, un seul de ces deux interrupteurs est fermé de sorte qu'il résulte une liaison rigide entre leurs fonctions de connexion soit :  $f_{c1} + f_{c2} = 1$ .

L'onduleur de tension est alimenté par une source de tension continue d'amplitude  $U_0$  à partir d'un pont redresseur associé à un filtre.

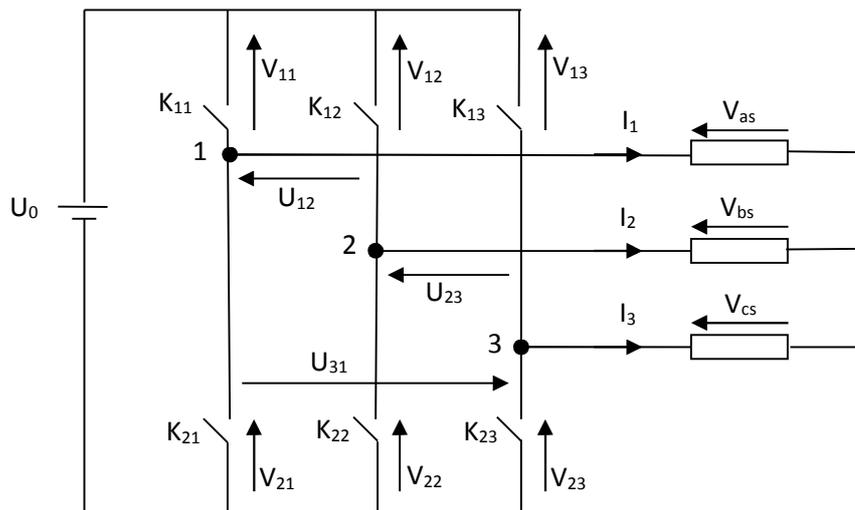


Figure III.4.1 Schéma équivalent de l'onduleur de tension.

A partir des notations de la figure (III.4-1) donnant la tension aux bornes de chaque interrupteur, on déduit les expressions des tensions composées :

$$\begin{aligned} U_{12} &= V_{as} - V_{bs} = V_{21} - V_{11} \\ U_{23} &= V_{bs} - V_{cs} = V_{31} - V_{21} \\ U_{31} &= V_{cs} - V_{as} = V_{11} - V_{31} \end{aligned} \quad (\text{III-21})$$

En introduisant les fonctions de connexion relatives à chacun d'entre eux, on obtient :

$$\begin{bmatrix} U_{12} \\ U_{23} \\ U_{31} \end{bmatrix} = U_0 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{III-22})$$

On admet que les tensions simples du récepteur forment un système triphasé équilibré :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{III-23})$$

### III-5-1-Stratégies de commande des onduleurs

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs modes [56] :

- Si l'onduleur ne peut commuter qu'à faible fréquence, il sera piloté en pleine onde ; le signal de commande sera la fréquence de la tension désirée en sortie et la source continue doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristors ou d'un hacheur).
- Si l'onduleur peut commuter à fréquence élevée, il sera piloté en modulation de largeur d'impulsion ce qui permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence, et la source continue peut être constante (pont à diodes).
- Une stratégie intermédiaire peut être nécessaire : si l'onduleur doit commuter à fréquence moyenne, les instants de commutation sont calculés de façon optimale en particulier pour éliminer les harmoniques.

Ces différentes stratégies peuvent être exclusives ou, au contraire, combinées ce qui est le cas pour de nombreux montages industriels qui superposent une stratégie de commutations préprogrammées avec une modulation de largeur des impulsions.

### III-5-1-1-Technique de la modulation de largeur d'impulsions

La technique de commande la plus utilisée pour la commande des onduleurs de tension est la modulation de largeur d'impulsions (MLI ou PWM -pulse width modulation-) [52]. Elle consiste à commander les interrupteurs de puissance du l'onduleur de manière à délivrer à la machine une suite d'impulsions d'amplitude fixe, positives ou négatives, et modulées en largeur. Cependant, la MLI génère des harmoniques qui créent des oscillations de couple dans les machines tournantes comme elle introduit des non-linéarités qui peuvent déstabiliser le système [57].

#### a-MLI vectorielle

L'onduleur de tension à MLI est le plus utilisé pour la commande du moteur asynchrone pour sa réponse rapide et ses performances élevées. Ils autorisent une très grande plage de variation de vitesse quelle que soit la forme du couple résistant [58].

Un onduleur de tension triphasé, à deux niveaux, possède six cellules de commutation donnant huit configurations possibles. Ces huit états de commutation peuvent s'exprimer dans le plan  $(\alpha, \beta)$  par huit vecteurs de tension notés de  $V_0$  à  $V_7$ . Parmi ces vecteurs, deux sont nuls et les autres étant répartis régulièrement à tous les  $60^\circ$ .

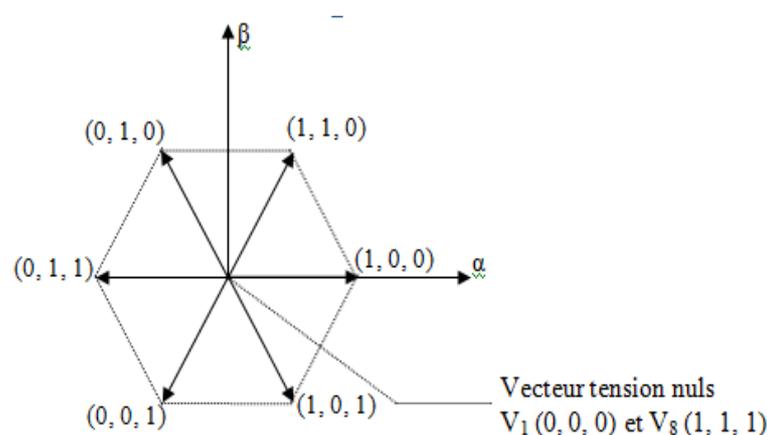


Figure III.5 : Vecteurs de tension créés par l'onduleur.

Le principe de MLI vectorielle consiste à projeter le vecteur  $V_s$  de tension statorique désiré sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondant à deux états de commutation de l'onduleur. Les valeurs de ces projections assurant le calcul des temps de commutations désirées correspondent à deux états non nuls de commutation de l'onduleur. Si nous notons  $t_i$

et  $t_{i+1}$  ces deux temps, leur somme doit être inférieure à la période  $T_{com}$  de commutation de l'onduleur. Pour maintenir la fréquence de commutation constante, un état nul de l'onduleur est appliqué durant une durée complémentaire à  $T_{com}$ .

### b-MLI sinus triangulaire

Le principe de cette technique consiste à comparer une tension sinusoïdale  $V_{ref}$ , appelée signal de référence, à un signal triangulaire appelée porteuse de fréquence  $f_p$ . L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs électronique de l'onduleur de tension [64].

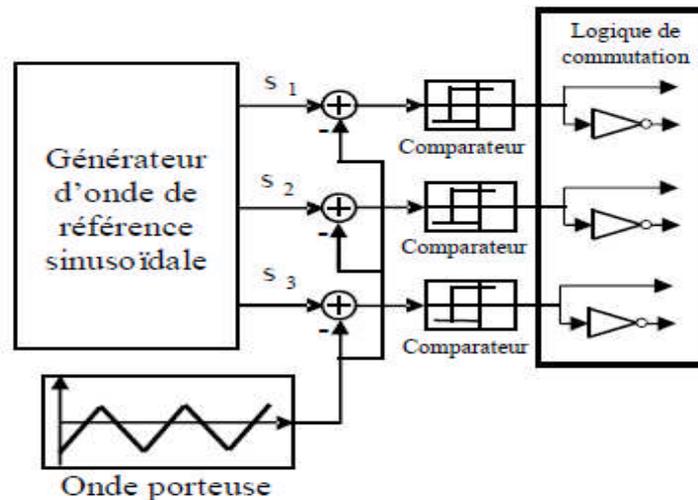
Cette technique se caractérise par deux paramètres :

- L'indice de modulation :  $m = f_p/f$ , où «  $f_p$  » est la fréquence de la porteuse et «  $f$  » est la fréquence de la référence.
- Le coefficient de réglage en tension  $r$  :

$$r = A_r/A_p$$

avec  $A_r$  : Amplitude de la référence.

$A_p$  : Amplitude de la porteuse



**Figure III.6** : Schéma de principe de la technique MLI triangulo-sinusoïdale.

### III-6-Différentes stratégies de commande de la machine asynchrone

Il existe un grand nombre de stratégies de pilotage de la machine asynchrone. L'objectif recherché est de faire produire à la machine le couple le plus élevé possible quelle que soit la vitesse, notamment aux basses vitesses (démarrage) et aux hautes vitesses, supérieures à la vitesse nominale [2].

### III-6-1-Commande vectorielle par orientation de flux

La commande vectorielle par orientation de flux (FOC) a été présentée au début des années 70 par F. Blaschke. Elle est basée sur une orientation du repère tournant tels que l'axe d soit confondu avec la direction de  $\varphi_r$  pour but d'avoir un découplage entre le flux et le couple de la machine. On retrouve ainsi l'une des caractéristiques intrinsèques de la machine à courant continu, à savoir la linéarité du couple dû à l'orthogonalité des vecteurs flux inducteur et courant d'induit [59]. La figure (III-6) montre la structure de la commande vectorielle. Cependant, cette commande présente une faiblesse face aux variations des paramètres de la machine en cours de fonctionnement, notamment la résistance statorique.

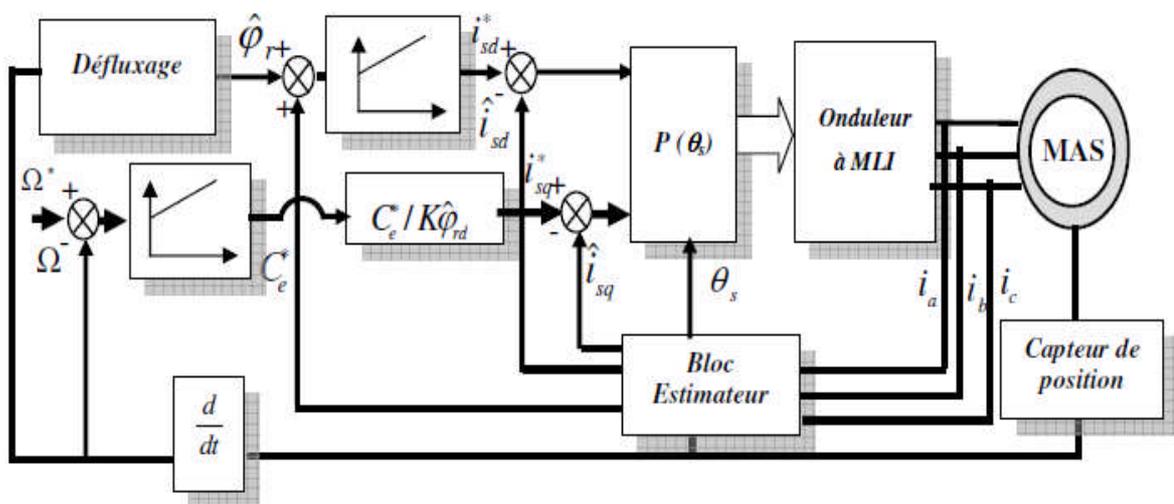


Figure III.7 : Schéma commande FOC

### III-6-2-Commande directe de couple (DTC)

La DTC présente une structure simplifiée robuste vis-à-vis les variations des paramètres de la machine et ne nécessite aucun capteur mécanique. Elle est basée sur la détermination directe de la séquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur de tension pour contrôler le flux statorique et le couple électromagnétique directement et indépendamment en utilisant deux comparateurs à hystérésis. La structure de la commande directe du couple est donnée par la figure (III-7) [59].

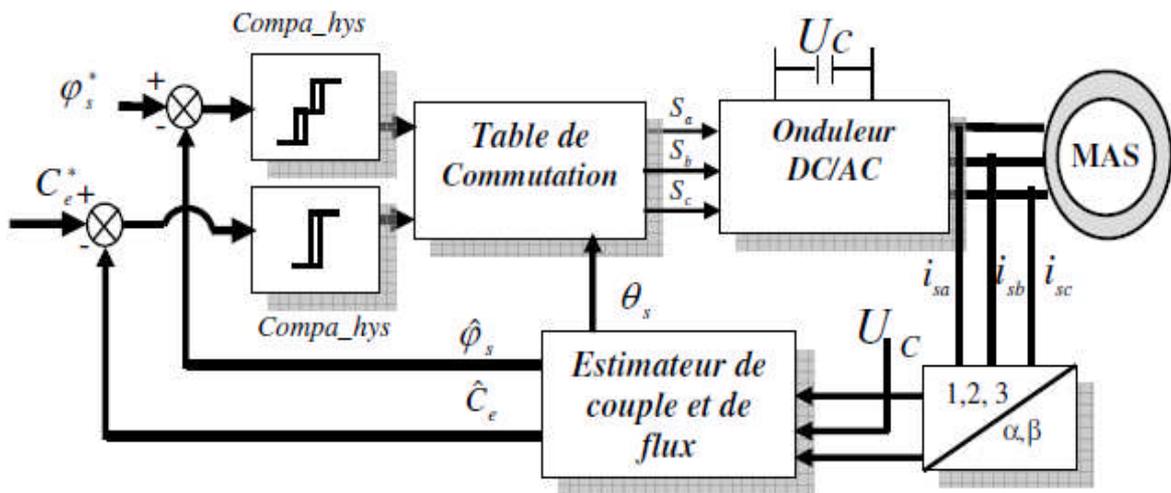


Figure III.8: Schéma de commande DTC.

### III-6-3- Commande scalaire

C'est la plus ancienne méthode de commande pour les machines à courant alternatif avec une structure très simple. Le contrôle scalaire de la machine asynchrone consiste à imposer aux bornes de l'induit, le module de la tension ou du courant ainsi que la pulsation [60]. Ce mode de contrôle s'avère le plus simple à réaliser mais le moins performant surtout pour des petites vitesses de fonctionnement [59]. Toutes les lois de commande scalaires sont basées sur le principe de l'inversion du modèle statique de la machine en vue de la commande [61]. La figure (III-8) montre la structure de la commande scalaire.

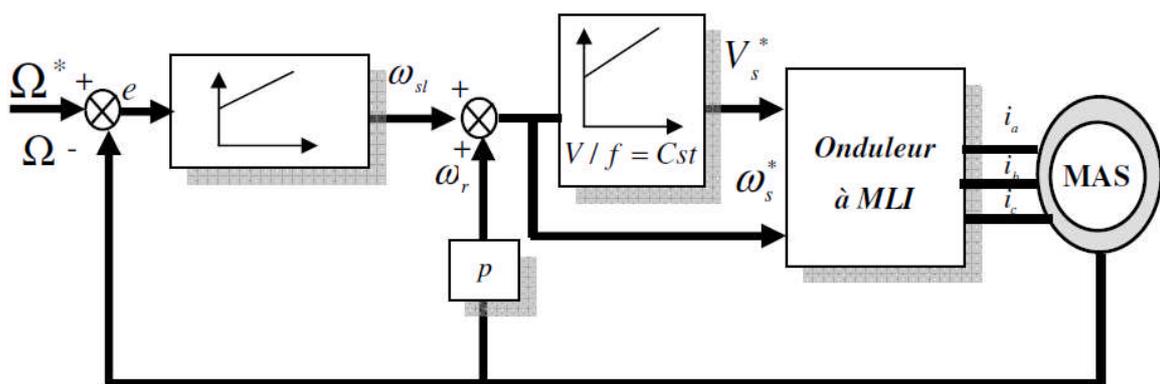


Figure III.9 : schéma de commande scalaire.

### III-6-3-1-Différentes lois de la commande scalaire

Par définition, les lois de commande statiques découlent des expressions établies à partir du schéma équivalent en régime permanent sinusoïdal [62]. Pour cette raison, l'étude du modèle de la machine en régime établi est importante.

#### ➤ Modélisation de la machine asynchrone en régime permanent

Dans le cas des conceptions en régime permanent, c'est les critères d'optimisation électrotechnique qui dominent : élimination d'harmoniques pour éviter les ondulations de couples dans les machines, minimisation des pertes dans les interrupteurs des onduleurs [63].

❖ **En régime permanent et dans un repère lié au rotor**, l'équation du circuit rotorique s'écrit :

$$0 = R_r \bar{I}_r + j \omega_r L_r \bar{I}_r + j \omega_r L_m \bar{I}_s \quad (\text{III-24})$$

$\omega_r$  : pulsation des courants rotoriques.

On note que pour une variable X on a :  $\bar{X} = \bar{X}_d + j \bar{X}_q$

Le flux statorique est donné par ses composantes dans les axes d et q du repère précédent :

$$\bar{\psi}_s = L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r \quad (\text{III-25})$$

On déduit,

$$\bar{I}_r = - \frac{j L_m \omega_r}{R_r + j L_r \omega_r} \bar{I}_s \quad (\text{III-26})$$

$$\bar{\psi}_s = L_s \frac{R_r + j L_r \sigma \omega_r}{R_r + j L_r \omega_r} \bar{I}_s \quad (\text{III -27})$$

d'où l'expression du courant statorique en fonction du flux :

$$I_s = \frac{\psi_s}{L_s} \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\omega_r L_r}{R_r}\right)^2}{1 + \left(\frac{\sigma \omega_r L_r}{R_r}\right)^2}} \quad (\text{III -28})$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = p L_m (I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) = p L_m \text{Im}(\bar{I}_s \bar{I}_r) \quad (\text{III -29})$$

A partir des équations (III-27, III-28), on aura :

$$C_e = p \left( \frac{L_m}{L_s} \right)^2 \psi_s^2 \frac{\omega_r}{R_r \left( 1 + \left( \sigma \frac{L_r}{R_r} \omega_r \right)^2 \right)} \quad (\text{III-30})$$

Cette relation montre clairement que lorsque le module du flux est constant, le couple ne dépend que de  $\omega_r$ . La valeur du couple est fixé par  $\omega_r$  et par le module du flux.

❖ **En régime permanent et dans un repère lié au stator**, on a :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + j \omega_s L_s \bar{I}_s + j \omega_s L_m \bar{I}_r \quad (\text{III-31})$$

A partir des équations (III-24), (II-25) et (II-27), la tension statorique peut se mettre sous la forme suivante:

$$V_s = \psi_s \frac{R_s}{L_s} \sqrt{\frac{1 - \left( \sigma \frac{L_s L_r}{R_s R_r} \omega_s \omega_r \right)^2 + \left( \frac{L_r}{R_r} \omega_r + \frac{L_s}{R_s} \omega_s \right)^2}{1 + \left( \frac{\sigma \omega_r L_r}{R_r} \right)^2}} \quad (\text{III-32})$$

Cette relation constitue le principe des lois de commande à flux constant des machines alimenté en tension [57].

### III-6-3-1-a-Alimentation en tension

Lors d'une variation de couple à une vitesse  $\omega_m$  constante, l'autopilotage ( $\omega_s = \omega_m + \omega_r$ ) donne à la machine un plus grand amortissement que dans le cas d'un fonctionnement à fréquence statorique constante. Un faible amortissement se traduit par des oscillations de courant et de couple. Ce phénomène est surtout sensible à basse vitesse et le système reste stable dans tous les cas [57].

La loi de commande (III-32) permet de maintenir le flux constant. Mais elle est trop complexe pour être exploitée, elle doit être simplifiée.

❖ Si la pulsation rotorique est très faible, alors :

$$V_s = \psi_s \omega_s \sqrt{1 + \left( \frac{R_s}{\omega_s L_s} \right)^2} \quad (\text{III-33})$$

- ❖ Si de plus  $R_s$  est négligeable, dans les domaines de fréquences statoriques élevées, alors :

$$V_s = \psi_s \omega_s \quad (\text{III -34})$$

Ces lois simplifiées ne suffisent pas à réguler le flux pour les faibles valeurs de  $\omega_s$  et les glissements élevés, souvent on ajoute un terme correctif pour prendre en compte de la pulsation rotorique, comme suit :

$$V_s = \psi_s (\omega_s + k \omega_r) \quad (\text{III -35})$$

où :  $k = \frac{R_s L_r}{R_r L_s}$

et  $k$  est le rapport des constantes de temps statorique et rotorique.

En régime sinusoïdal permanent, la conservation du rapport (V/f) constant permet au circuit magnétique d'être dans le même état magnétique quelque soit la fréquence d'alimentation. La forme de cycle d'hystérésis parcouru par le circuit magnétique reste identique pour n'importe quelle fréquence [64].

### III-6-3-1-a-1- Commande scalaire avec contrôle de la fréquence statorique

Le dispositif de commande fixe la fréquence à partir de l'erreur de vitesse et la tension à partir d'une loi en V/f. Une seconde boucle interne assure la limitation de courant. L'onduleur peut effectuer à la fois le réglage de fréquence et de tension. Dans ce cas, le redresseur est un pont de diodes [57]. Le schéma de principe de cette commande est représenté sur la figure (III-10).

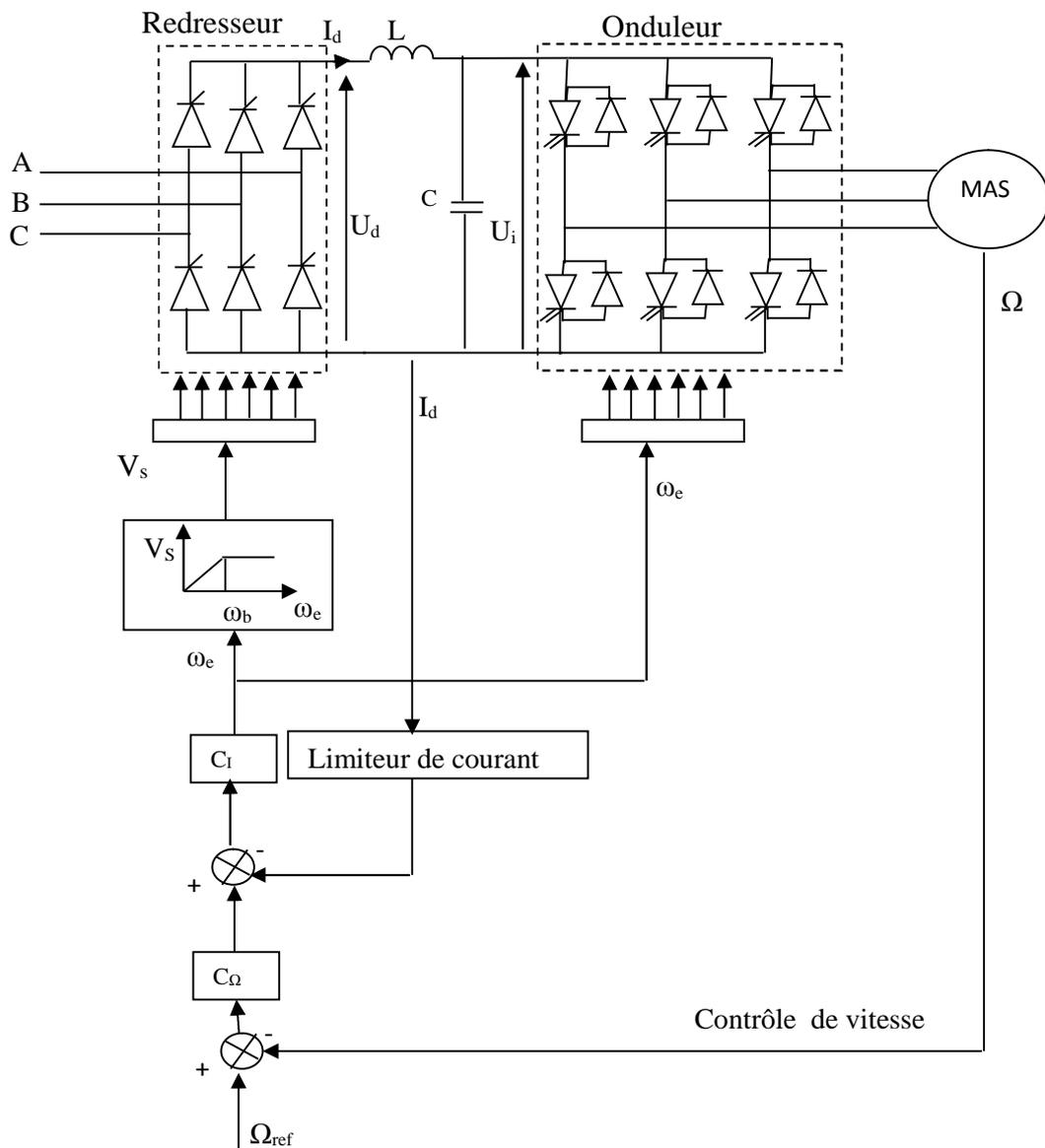


Figure III.10: Commande scalaire avec contrôle de  $\omega_s$ .

### III-6-3-1-a-2-Commande scalaire avec contrôle de la fréquence rotorique

Dans ce cas, la variation de vitesse est liée directement au couple. Le régulateur  $C_\Omega$  élabore  $\omega_r$  à partir de l'erreur de vitesse. La fréquence statorique est obtenue par la loi d'autopilotage qui nécessite une mesure précise de la vitesse. Son réglage est confié à l'onduleur. La tension est donnée par une loi en « V/f ». Le schéma de commande est représenté sur la figure (III-11).

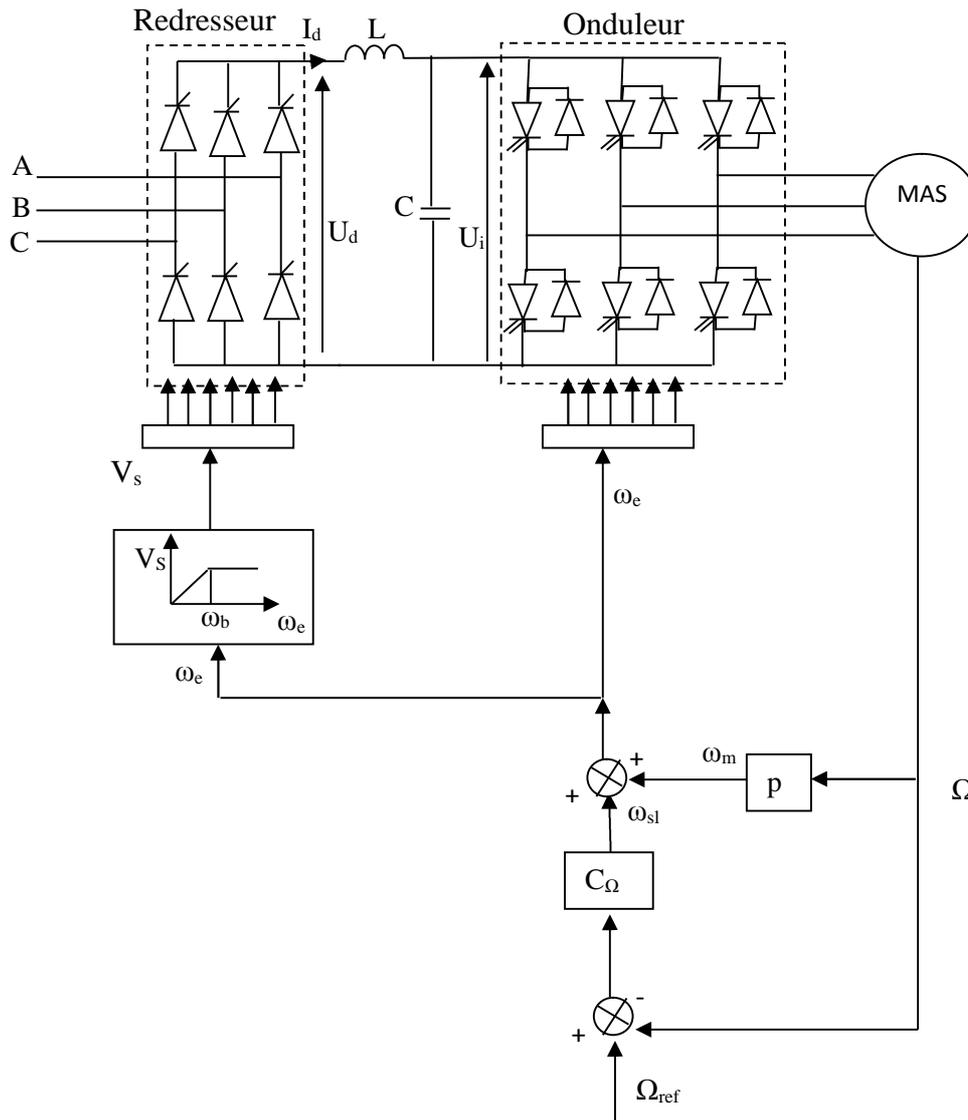


Figure III.11 : Commande scalaire avec contrôle de  $\omega_r$ .

### III-6-3-1-b-Alimentation en courant

Une étude des pôles des transmittances reliant la vitesse au courant statorique et au couple résistant met en évidence une zone d'instabilité de fonctionnement (pour les fréquences rotoriques élevées) lors d'un contrôle direct de la fréquence statorique. Le contrôle avec autopilotage est donc indispensable en boucle ouverte.

La loi suivante permet de maintenir le module de flux statorique constant :

$$I_s = \frac{\psi_s^*}{L_s} \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\omega_r L_r}{R_r}\right)^2}{1 + \left(\frac{\sigma \omega_r L_r}{R_r}\right)^2}} \quad (\text{III -34})$$

$\psi_s^*$  : est le flux désiré (flux nominal en fonctionnement normal).

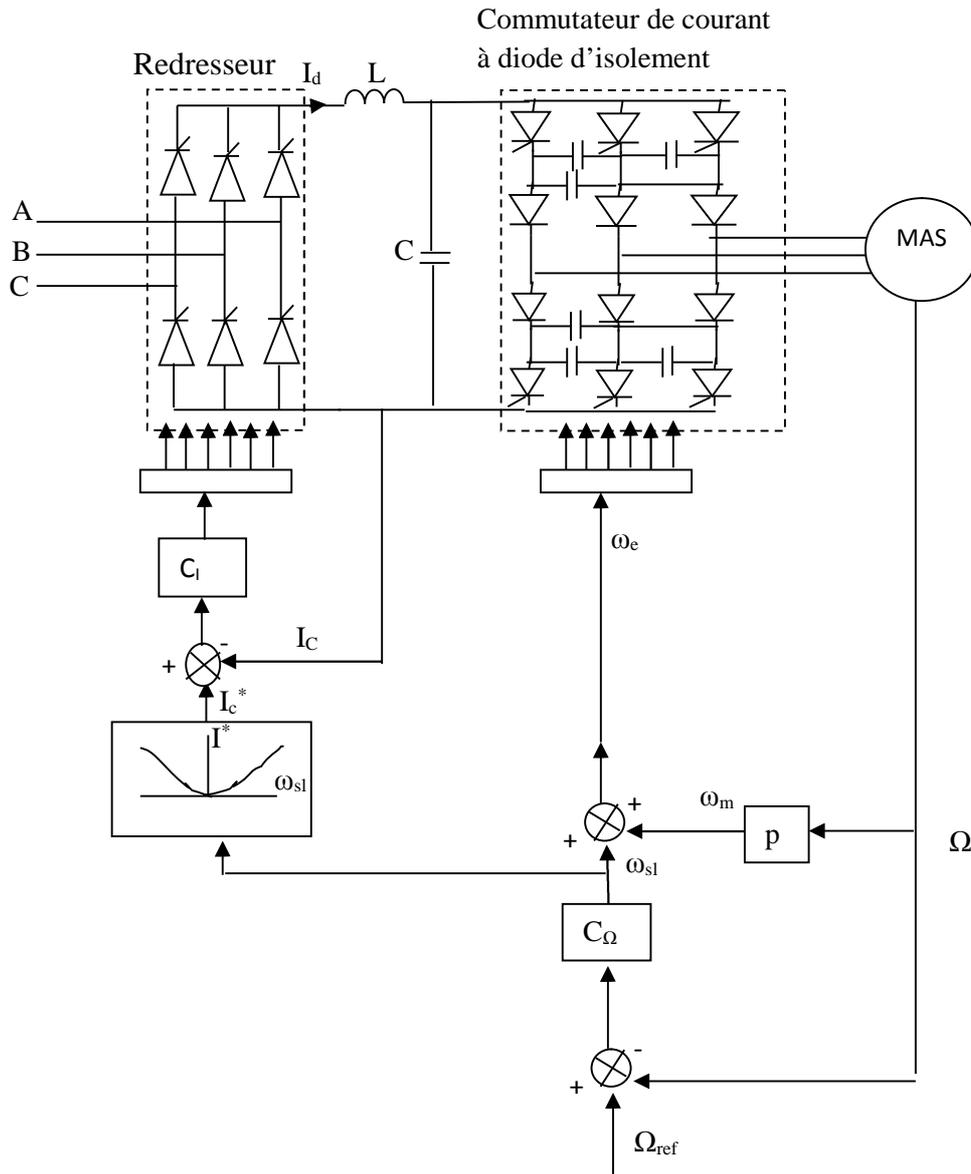


Figure III.12 : Commande scalaire avec alimentation en courant.

**III-7-Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle mathématique de la machine asynchrone triphasée dont la complexité est réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Une représentation sous forme d'état est élaborée, à partir des lois physiques qui régissent son fonctionnement en alimentant notre machine en tension. La modélisation de la machine en régime permanent était nécessaire afin d'établir la loi de commande « V/f constant » appliquée à notre système d'entraînement.

## Chapitre IV

### **Elaboration du schéma de commande du système d'entraînement et Analyse des caractéristiques dynamiques de l'installation de pompage**

## **IV-1-Introduction**

Selon les études faites par des industriels (ABB industriel), les variateurs de vitesse utilisés pour contrôler la vitesse du moteur des pompes ont des économies d'énergie allant de 30 à 60%.

Le choix de la technologie et de la structure du convertisseur dépend de nombreux facteurs liés à l'application visé [65]. Un facteur essentiel est le critère économique de l'installation qui représente le coût total d'investissement comprenant le coût du variateur, du moteur et de leur exploitation.

Un deuxième facteur principal est le facteur technique du choix qui dépend de :

- la puissance et la vitesse nominale du moteur,
- la plage de variation de vitesse et le domaine de fonctionnement dans le plan puissance-vitesse (les quadrants de fonctionnement du moteur),
- la précision de contrôle du couple et de la vitesse,
- la tension du réseau d'alimentation,
- les contraintes d'installation (place disponible, degrés de protection, etc.).

## **IV-2-Détermination des paramètres principaux et élaboration du système de commande**

Dans les stations de pompage d'eau utilisant les variateurs de vitesse, la plupart des types de régulations sont possibles, que ce soit la régulation de pression ou du débit, donc il n'est pas nécessaire de démarrer ou arrêter le moteur plusieurs fois (marche/arrêt), et cela évitera la régulation avec les vannes d'étranglement où le moteur tourne à sa vitesse nominale [40]. La régulation par le variateur de vitesse se fait de tel façon à ce que :

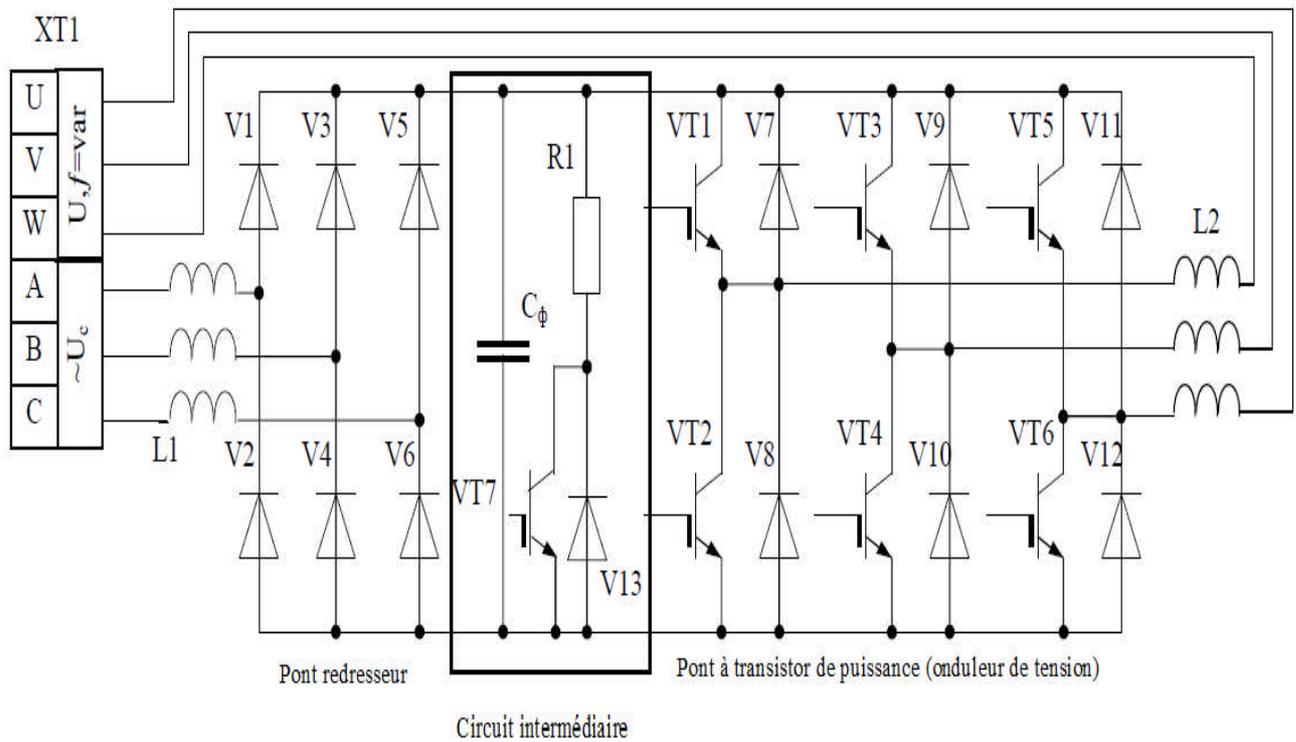
- Si la consommation des clients est importante, elle provoquera la diminution de la pression dans les conduites et le variateur augmentera la vitesse du moteur afin de pomper plus d'eau vers les clients.
- Si la consommation diminue, la pression va augmenter dans les conduites et le variateur va diminuer la vitesse du moteur.

### **IV-2-1-Elaboration du schéma de puissance de l'entraînement électrique automatisé**

Les variateurs les plus répandus sont constitués d'un pont redresseur associé à un filtre, et d'un onduleur autonome qui délivre au moteur un système de tension ou de courants

alternatifs triphasés, réglables en fréquence et en valeur efficace, grâce à des lois appropriées de commande des interrupteurs électroniques [66].

Le schéma de principe du convertisseur de fréquence, proposé dans ce travail, est représenté sur la figure (IV-1).



**Figure IV.1** : Schéma de circuit de puissance.

**1-Le redresseur** : il se compose d'un pont triphasé à diodes qui délivre une tension continue d'amplitude pratiquement constante.

**2-Le circuit intermédiaire** : comportant principalement un condensateur de forte capacité. Le circuit intermédiaire peut être considéré comme un accumulateur dans lequel le moteur puise son énergie en passant par l'onduleur. Il comporte :

- **Un condensateur C** qui stocke l'énergie côté réseau ce qui nécessite une capacité importante. Le moteur connecté au convertisseur de fréquence soutire l'énergie du circuit intermédiaire ce qui décharge partiellement le condensateur. Il permet également de filtrer les harmoniques engendrés par le pont redresseur ainsi que ceux engendrés par l'onduleur.

- **Le transistor (VT7) et la diode (V13)** servent à la commutation de la résistance de freinage R1. L'énergie provenant du moteur est stockée dans le circuit intermédiaire du convertisseur. Cette énergie est éliminée par la résistance de freinage.

### 3-L'onduleur de tension :

A partir de la tension continue, l'onduleur génère de nouveau un courant alternatif avec la fréquence et la tension voulues. L'onduleur nécessite l'utilisation d'interrupteurs électroniques de puissance entièrement commandables, c'est pourquoi on utilise actuellement des transistors IGBT et des thyristors GTO [65].

### 4-L'intérêt d'utilisation des inductances L1 et L2

- **Les inductances L1** permettent d'assurer une meilleure protection contre les surtensions du réseau et de réduire les harmoniques de courant produits par le variateur.
- **Les inductance L2** servent à la limitation des surtensions aux bornes du moteur, c'est pour réduire les courants harmoniques à haute fréquence dus à l'écart entre les tensions fournies par l'onduleur et les tensions du moteur.

### IV-2-2-Calcul des paramètres du variateur de fréquence

1-Calcul de la puissance d'entrée du variateur  $P_{ent}$  :

$$P_{ent} = \frac{P_{mot}}{(\eta_{conv} \eta_{mot})} = 9,5 \text{ kW} \quad (\text{IV-1})$$

2-Calcul du courant d'entrée de phase du variateur :

$$I_{ent} = \frac{P_{ent}}{(3 \cos \varphi_{conv} U_{Ph})} = 15,19 \text{ A} \quad (\text{IV-2})$$

3-Calcul de la chute de tension admissible :

$$\Delta U_{adm} = 0,03 U_n = 6,6 \text{ V} \quad (\text{IV-3})$$

4-Calcul de la réactance inductive  $X_1$  :

$$X_1 = \frac{\Delta U_{adm}}{I_{ent}} = 0,44 \ \Omega \quad (\text{IV-4})$$

### IV-2-3-Calcul de l'inductance du filtre L1

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \pi f} = 0,0014 \text{ H} \quad (\text{IV-5})$$

1-Calcul de la puissance dissipée dans L1 :

$$\sigma_{p1} = 0,02 \quad P_{ent} = 0,19 \text{ kW} \quad (\text{IV-6})$$

2-Calcul de la puissance du variateur :

$$P_{conv} = P_{ent} - \sigma_{p1} = 9,31 \text{ kW} \quad (\text{IV-7})$$

3-Calcul du courant à la sortie du variateur :

$$I_{sort} = \frac{P_{mot}}{(3 \cos \varphi_{conv} U_{Ph})} = 11,96 \text{ A} \quad (\text{IV-9})$$

4-Calcul de la réactance X2 :

$$X_2 = \frac{\Delta U_{adm}}{I_{sort}} = 0,55 \Omega \quad (\text{IV-10})$$

#### **IV-2-4-Calcul de l'inductance du filtre L2**

$$L_2 = \frac{X_2}{2 \pi f} = 0,0018 \text{ H} \quad (\text{IV-11})$$

1-La puissance dissipée dans L2 :

$$\sigma_{p2} = 0,02 \quad P_{mot} = 0,15 \text{ kW} \quad (\text{IV-12})$$

## IV-2-5-Elaboration du système de commande

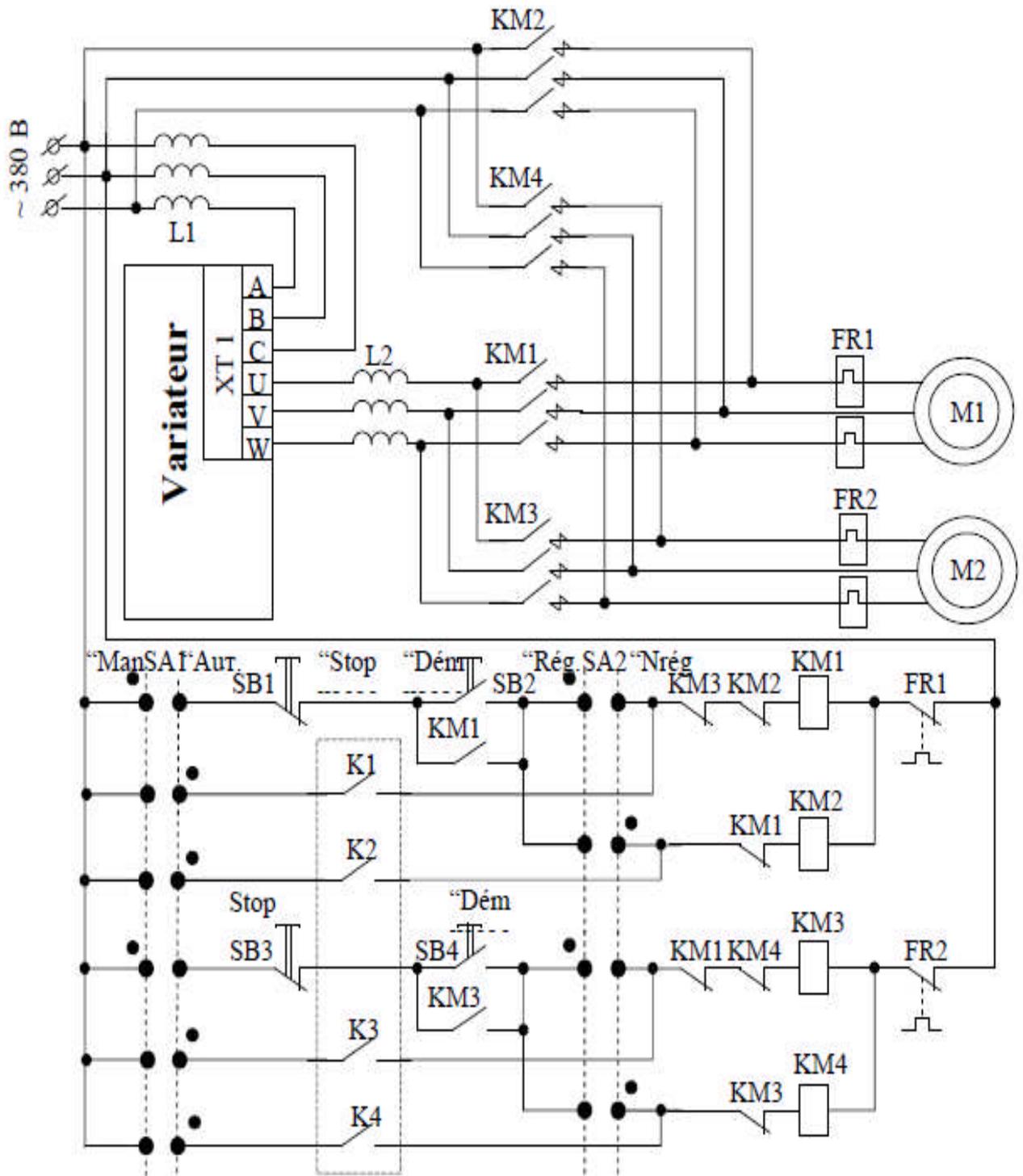


Figure IV.2 : Schéma principal de l'entraînement électrique.

Sur la figure (IV.2), on représente le schéma principal de l'entraînement électrique d'une station de pompage d'eau dotée de deux moteurs électriques avec un circuit de commande et un variateur de fréquence.

### IV-2-5-1-Principe de fonctionnement

Les moteurs M1 et M2 peuvent fonctionner selon l'ordre suivant :

- A- Le moteur **M1\_principal** (branché au variateur de fréquence), **M2\_réserve** (débranché).
  - B- Le moteur **M1\_principal** (branché au variateur de fréquence), **M2\_réserve** (branché directement au réseau).
  - C- Le moteur **M2\_principal** (branché au variateur de fréquence), **M1\_réserve** (débranché).
  - D- Le moteur **M2\_principal** (branché au variateur de fréquence), **M1\_réserve** (branché directement au réseau).
- Le système d'entraînement électrique schématisé sur la figure (IV-2) peut fonctionner selon deux régimes :

**A-Régime de fonctionnement manuel :** Avec un signal de consigne en fréquence de la tension de sortie venant du pupitre de commande : la fermeture manuelle du bouton poussoir **SB2** provoque l'excitation de la bobine KM1, et l'ouverture des interrupteurs KM2 et KM3, à ce moment le contact KM1 sera donc maintenu le temps qu'on veut ; et le moteur M1 sera alimenté par le variateur de fréquence. L'action sur le bouton poussoir **SB4** provoque l'excitation de KM3, l'ouverture des interrupteurs KM4 et KM1 et le moteur M2 sera alimenté par le variateur de fréquence.

Lors du fonctionnement de variateur de fréquence jusqu'à la fréquence de consigne, ce dernier peut être maintenu à cette fréquence le temps qu'on veut. Pendant ce régime, le signal provenant du capteur des paramètres technologiques externe (capteurs de pression) n'influe pas sur le fonctionnement de l'entraînement électrique lors de son enclenchement en boucle fermé (fonctionnement stable).

**B-Régime de fonctionnement automatique :** la régulation de la fréquence de la tension de sortie s'effectue en fonction de signal du capteur externe. La fréquence de la tension est choisie automatiquement en fonction de la valeur instantanée du signal injecté dans le système de commande, à partir du capteur des paramètres technologiques externes (capteurs de pression). Lors de ce régime, on distingue les deux modes de fonctionnement des moteurs M1 et M2 :

**1- Le moteur M1 :** la fermeture de l'interrupteur K1 provoque l'excitation de la bobine KM1 et l'ouverture des interrupteurs KM3 et KM2, donc la fermeture des interrupteurs KM4 et KM1 ; le moteur M1 sera alimenté par le variateur de fréquence tandis que le moteur M2 est

branché directement au réseau. La fermeture de l'interrupteur K2 provoque l'excitation de la bobine KM2, et l'ouverture de KM1; le moteur M1 fonctionne en mode direct (branché directement au réseau).

**2- Le moteur M2 :** la fermeture de l'interrupteur K3 provoque l'excitation de la bobine KM3 et l'ouverture des interrupteurs KM1 et KM4 ; le moteur M2 sera alimenté par le variateur de fréquence. A ce moment, les interrupteurs KM2 et KM3 seront fermés, ce qui implique que le moteur M1 fonction en mode direct. La fermeture de l'interrupteur K4 provoque l'excitation de la bobine KM4 et l'ouverture de l'interrupteur KM3; le moteur M2 fonctionne en mode direct (alimenté directement par le réseau).

### IV-3-Loi de commande appliquée au variateur de fréquence

La solution qui paraît, a priori, la plus simple pour faire varier la vitesse d'un moteur asynchrone est celle qui consiste à faire varier la fréquence de sa source d'alimentation. La mise en œuvre de ce principe, pour des applications industrielles, utilise un convertisseur de puissance qui transforme le système triphasé de tensions de fréquence et d'amplitude fixes en un système triphasé de tensions ou de courants de fréquence et d'amplitude maîtrisées [65].

Lorsque le glissement est faible, l'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation (IV-13) :

$$C_e = 3 p \psi_s^2 \frac{g \omega_s}{R_r} \quad (\text{IV-13})$$

L'inductance de fuite est donc négligée de sorte que la valeur efficace du flux a pour expression :

$$\psi_s = \sqrt{\frac{(V_s L_s R_r)^2}{(R_s R_r)^2 + (L_s R_r + g L_s R_s)^2 \omega_s^2}} \quad (\text{IV-14})$$

Ainsi, le réglage du flux apparaissant difficile à réaliser sous cette forme, on procède à des simplifications reposant sur des hypothèses essentiellement validées aux vitesses suffisamment élevées (>25% de la vitesse nominale) [54].

Si le glissement est faible, on a :  $g R_s \ll R_r$  d'où :

$$\psi_s = \sqrt{\frac{(V_s L_s R_r)^2}{R_s^2 + L_s^2 \omega_s^2}} \quad (\text{IV-15})$$

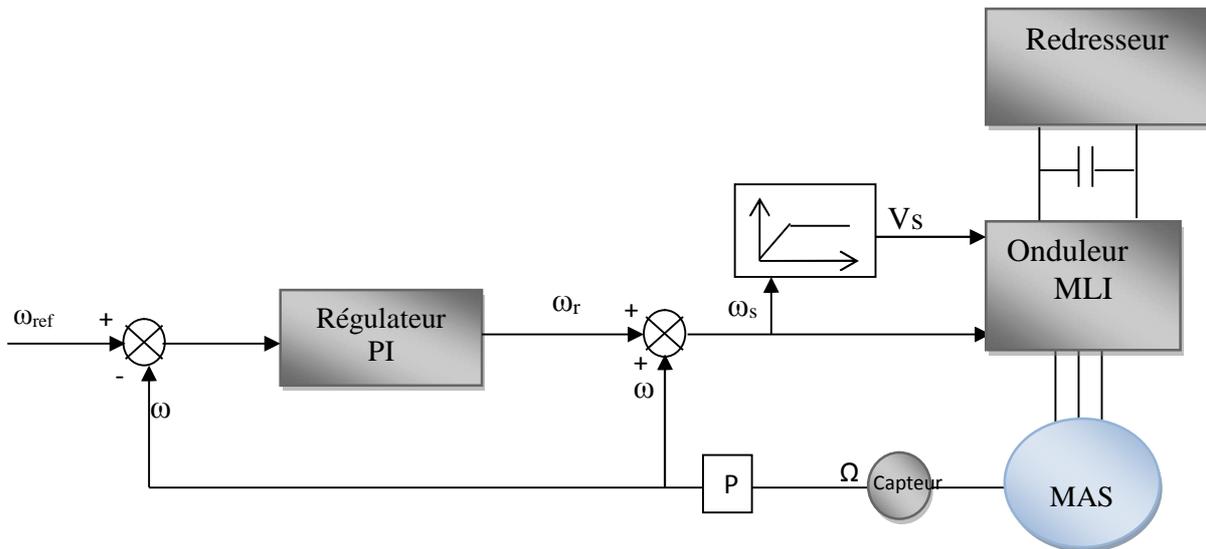
Si, de plus, la résistance statorique est telle que :  $R_s \ll L_s \omega_s$ , alors :

$$\psi_s = \sqrt{\frac{V_s^2}{\omega_s^2}} \quad (\text{IV-16})$$

Le couple permanent (expression IV-13) devient :

$$C_e = 3 p \left( \frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \frac{g \omega_s}{R_r} \quad (\text{IV-17})$$

Le maintien du flux constant exige donc de fixer le rapport  $\left( \frac{V_s}{\omega_s} \right)$  quel que soit le point de fonctionnement. Ce principe est le plus simple en matière de variation de vitesse du moteur asynchrone.



**Figure IV.3 :** Schéma de principe de la commande « V/f constant »

On en déduit la pulsation statorique ( $\omega_s = p \Omega + \omega_r$ ) de l'alimentation par l'addition la vitesse du moteur et de la pulsation rotorique issue d'un régulateur de vitesse PI. La tension  $V_s$  est calculée de manière à garder le rapport V/f constant, selon la loi de commande décrite précédemment.

#### IV-4-Synthèse du régulateur de vitesse

Une boucle de régulation est faite pour maintenir la grandeur de sortie égale à la référence en dépit des perturbations intervenantes sur le processus. Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante, ainsi que pour compenser la constante du temps mécanique.

Théoriquement une action proportionnelle suffit de garantir les performances exigée par la boucle de vitesse, mais cette action, lors d'un changement de consigne de vitesse fait subsister un écart, dit aussi erreur statique, que l'action intégrale assure bien son annulation et accélère l'établissement de la vitesse [38].

La fonction de transfert de régulateur PI est donné par :

$$F(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \quad (\text{IV-18})$$

L'équation mécanique s'écrit comme suit:

$$J \frac{d\Omega}{dt} - k_f \Omega = C_e - C_r \quad (\text{IV-19})$$

Si on néglige les frottements  $k_f = 0$ , on aura la fonction de transfert du système en boucle fermée suivante:

$$\Omega = \frac{k_p P + k_i}{J P^2 + (k_p) P + k_i} \Omega_{ref} - \frac{P}{J P^2 + (k_p) P + k_i} C_r \quad (\text{IV-20})$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de deuxième ordre. En comparant l'équation caractéristique de la fonction de transfert avec la forme standard du second ordre.

On trouve :

$$\frac{k_i}{J} = \omega_0^2 \quad \text{et} \quad \tau = \frac{2\xi}{\omega_0}$$

$\xi$  : coefficient d'amortissement.

Pour un coefficient d'amortissement  $\xi = 1$ , on aura :

$$k_i = \frac{4J}{\tau} \quad (\text{IV-21})$$

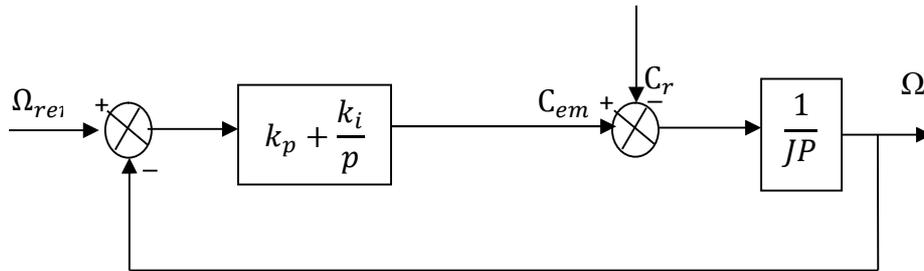
Pour calculer  $k_i$ , la constante de temps associée au régulateur est choisie en fonction de la constante de temps statorique qui caractérise la dynamique du couple [56], on prend :

$$\tau = \frac{L_S}{R_S}$$

La constante  $k_p$  est donnée simplement par :

$$k_p = k_i \tau \quad (\text{IV-22})$$

La boucle de régulation de vitesse est donnée par la figure suivante :

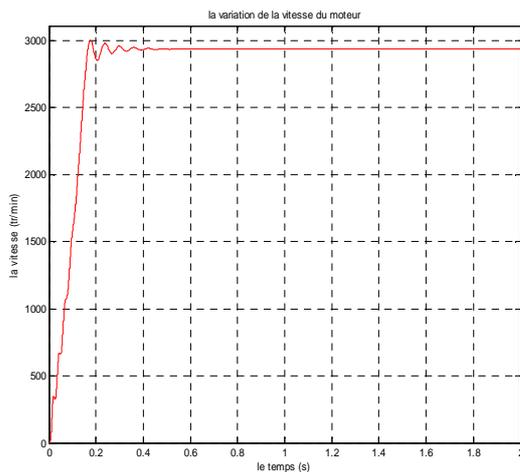


**Figure IV.4 :** Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de vitesse.

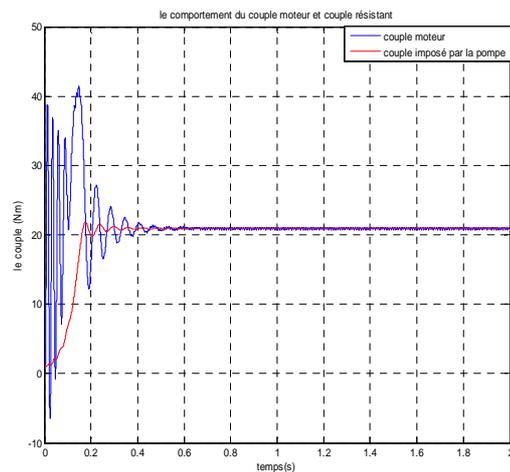
## IV-5-Analyse des caractéristiques dynamiques de l'installation de pompage

### IV-5-1-Résultats de simulation du groupe électropompe alimenté directement par le réseau électrique:

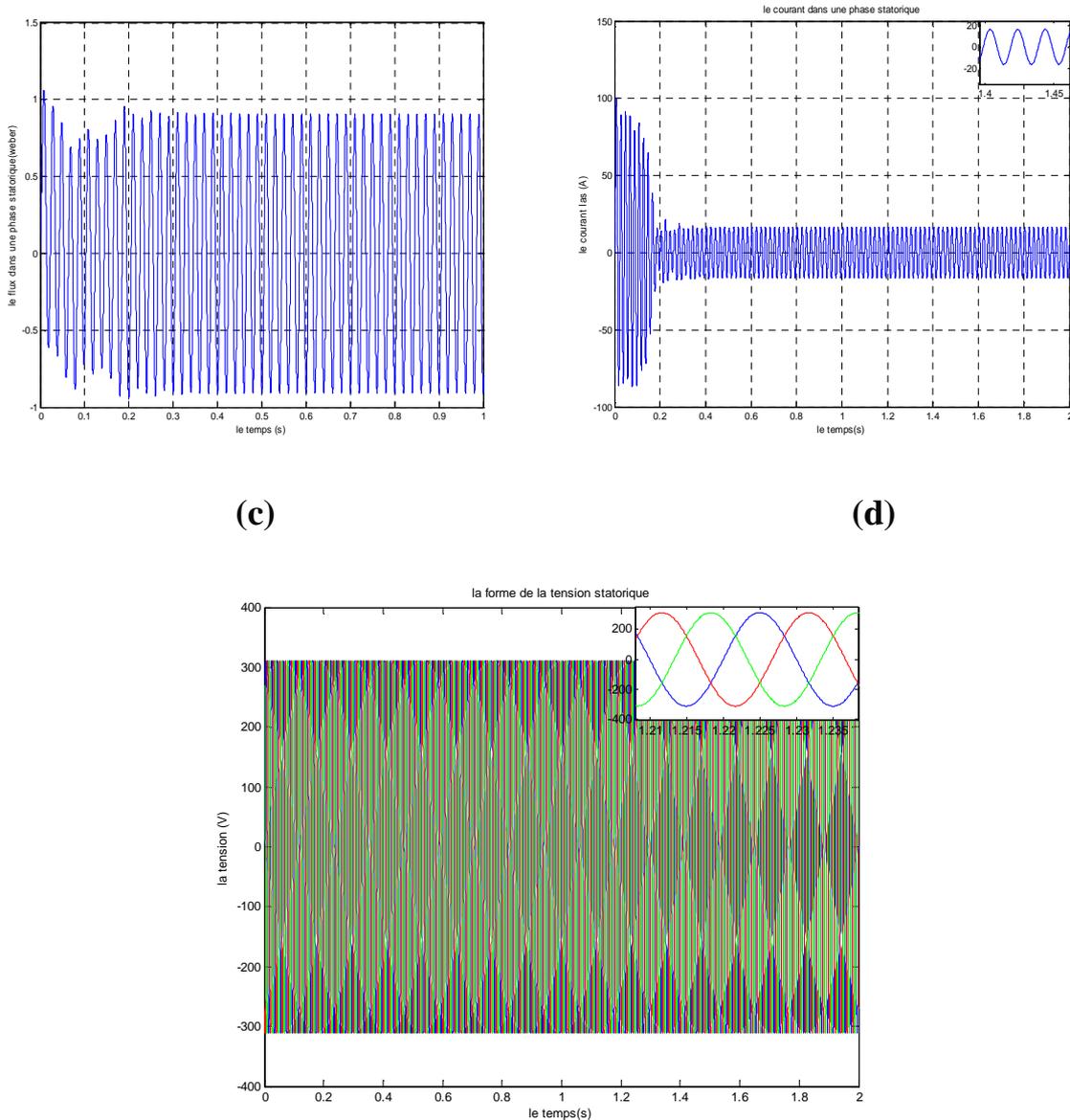
Les résultats de simulation du groupe électropompe branché directement sur le réseau sont représentés sur les figures (IV.5) et (IV.6).



(a)



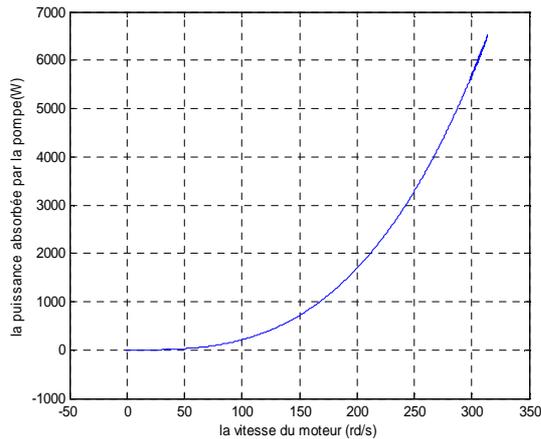
(b)



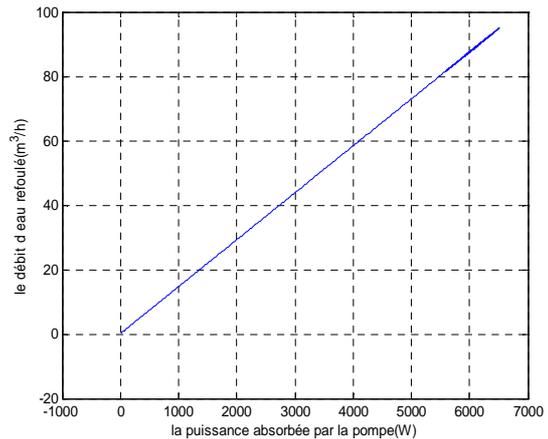
**Figure IV.5** : représentation des caractéristiques du moteur.

L'évolution de la vitesse de rotation du moteur, le couple électromagnétique développé par le moteur, le courant dans une phase statorique, le flux statorique et la tension statorique étant représentés sur la figure (IV-5).

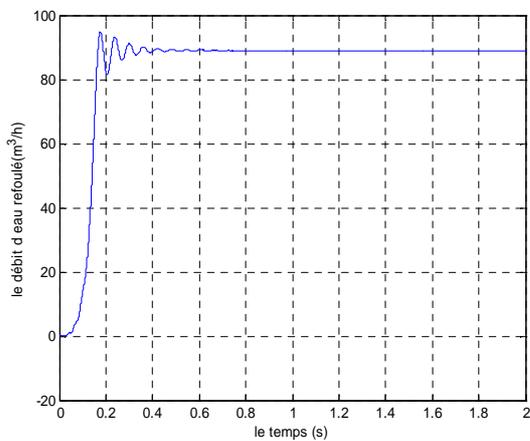
Le couplage de la pompe au moteur engendre une diminution de la vitesse de rotation du moteur (2935 tr/min). Cette diminution est due à la charge appliquée au moteur, qui est la pompe centrifuge, qui crée un couple résistant de l'ordre de 20Nm (figure : IV-5-b), notons que le courant statorique atteint 16,4 A en régime permanent.



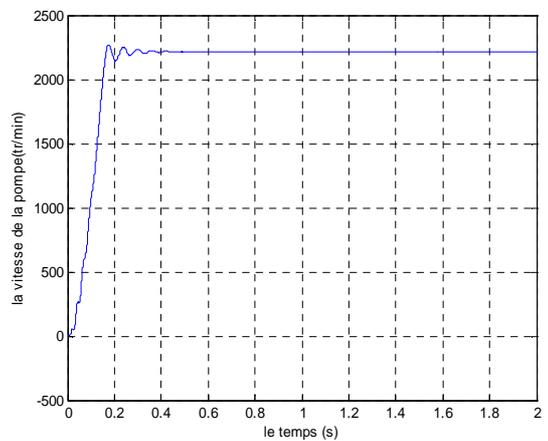
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure IV.6:** représentation des caractéristiques de la pompe.

La figure (IV-6) montre les résultats de simulation liés à la partie hydraulique (la pompe) : la vitesse de rotation, le débit et la puissance absorbée par la pompe.

La variation de la puissance absorbée par la pompe en fonction de la vitesse de rotation du moteur d'entraînement, est montrée sur la figure (IV.6-a). Cette puissance représente la puissance mécanique fournie par le moteur (à l'arbre du moteur). Elle est proportionnelle au cube de la vitesse de rotation :

$$P_m = K \Omega^3 \quad (\text{IV-23})$$

$\Omega$  : la vitesse de rotation du moteur,  $k$  est une constante.

En effet, la puissance absorbée ( $P_m$ ) par la pompe peut être également déterminée avec une précision suffisante en utilisant la formule suivante :

$$P_m = \rho g Q \frac{H}{\eta} = P_h / \eta \quad (\text{IV-24})$$

$P_m$  : puissance mécanique fournie par le moteur,

$\rho$  : masse volumique de l'eau, en  $\text{kg/m}^3$ ,

$g$  : accélération de pesanteur =  $9,81 \text{ m/s}$ ,

$H$  : hauteur manométrique totale, en m,

$\eta$  : rendement de la pompe,

$P_h$  : puissance hydraulique fournie par la pompe.

Le débit  $Q$  est proportionnel à la puissance absorbée par la pompe tel qu'il est montré sur la figure (IV-6-b). La variation du débit en fonction du temps dépend de la variation de la vitesse de la pompe (figures (IV-6-c) et (IV-6-d)). Cependant, en pratique dans une station de pompage, le débit refoulé par une pompe est mesuré sur une période à déterminer (24h minimum).

## **IV-5-2. Résultats de simulation du groupe électropompe associé au variateur de vitesse**

### **➤ Résultats de simulation à la vitesse nominale $N_n = 2922 \text{ tr/min}$**

Après avoir testé le comportement du groupe électropompe branché directement au réseau, nous alimentons notre système d'entraînement par un variateur de fréquence. On représente dans ce qui suit les résultats de simulation du système, dont le moteur tourne à sa vitesse nominale.

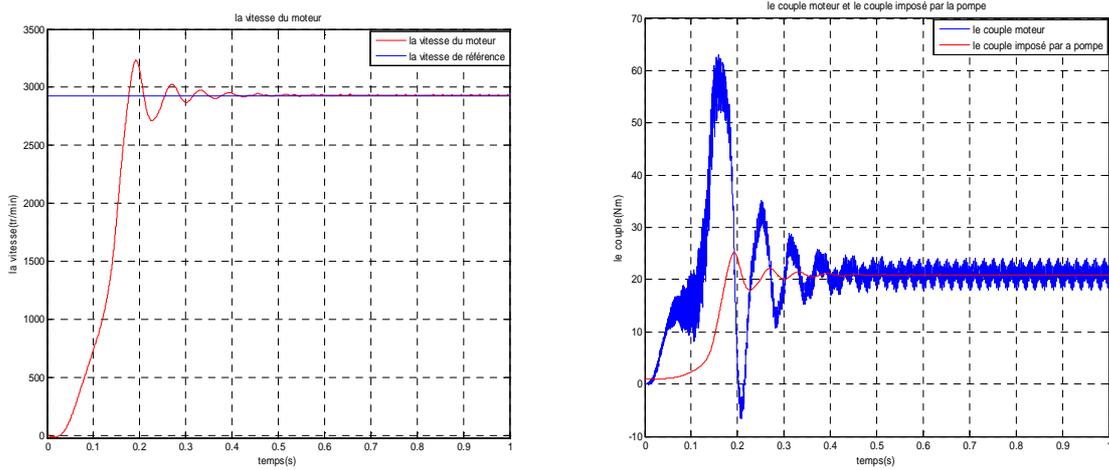


Figure IV.7 : représentation de la vitesse et du couple.

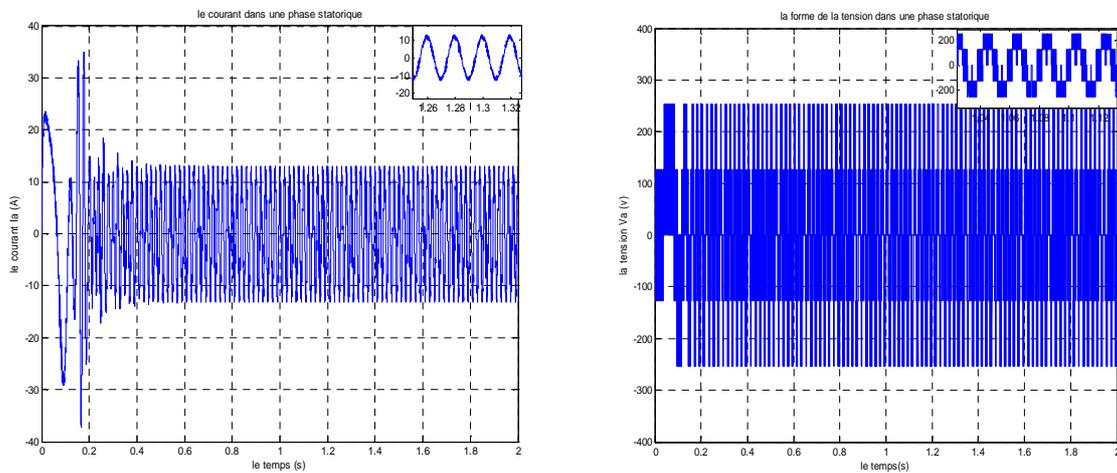


Figure IV.8 : forme du courant et de la tension dans une phase statorique.

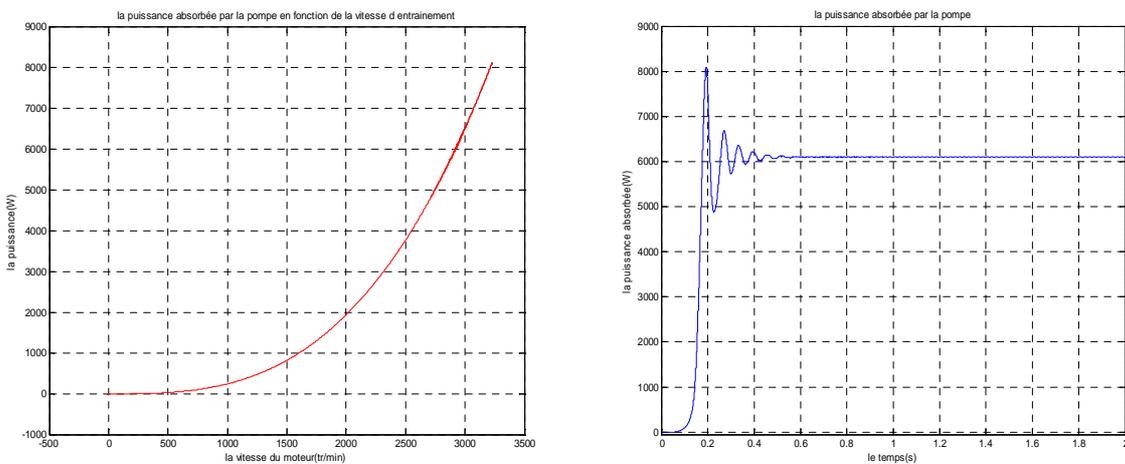
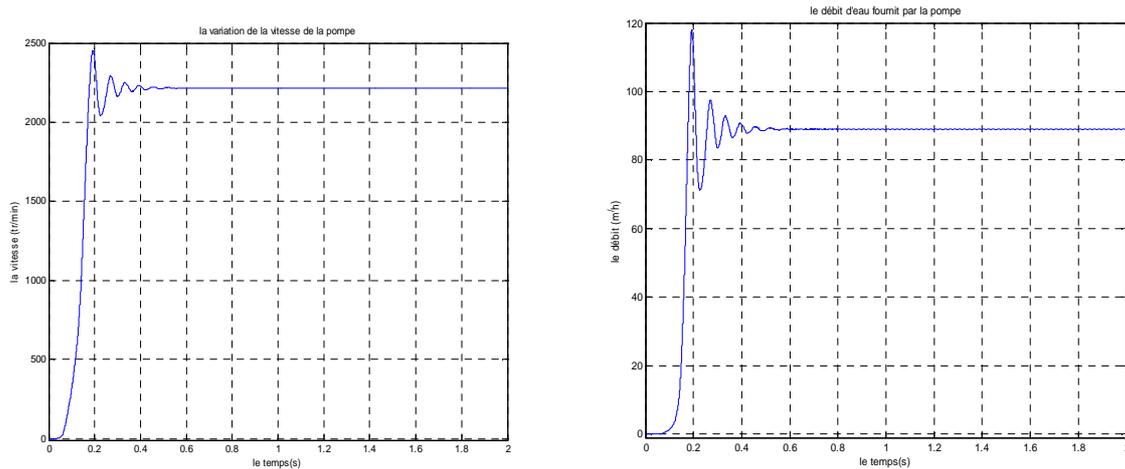


Figure IV.9 : variation de la puissance absorbée par la pompe.



**Figure IV.10** : représentation de la vitesse de la pompe et du débit refoulé.

### ➤ Interprétation des résultats

Les figures (IV-7) et (IV-8) montrent les différentes caractéristiques du moteur (la vitesse du moteur, son couple électromagnétique et les formes du courant et de la tension statorique) et les figures (IV-9) et (IV-10) représentent les caractéristiques de la pompe (le couple imposé par la pompe, sa puissance et le débit refoulé).

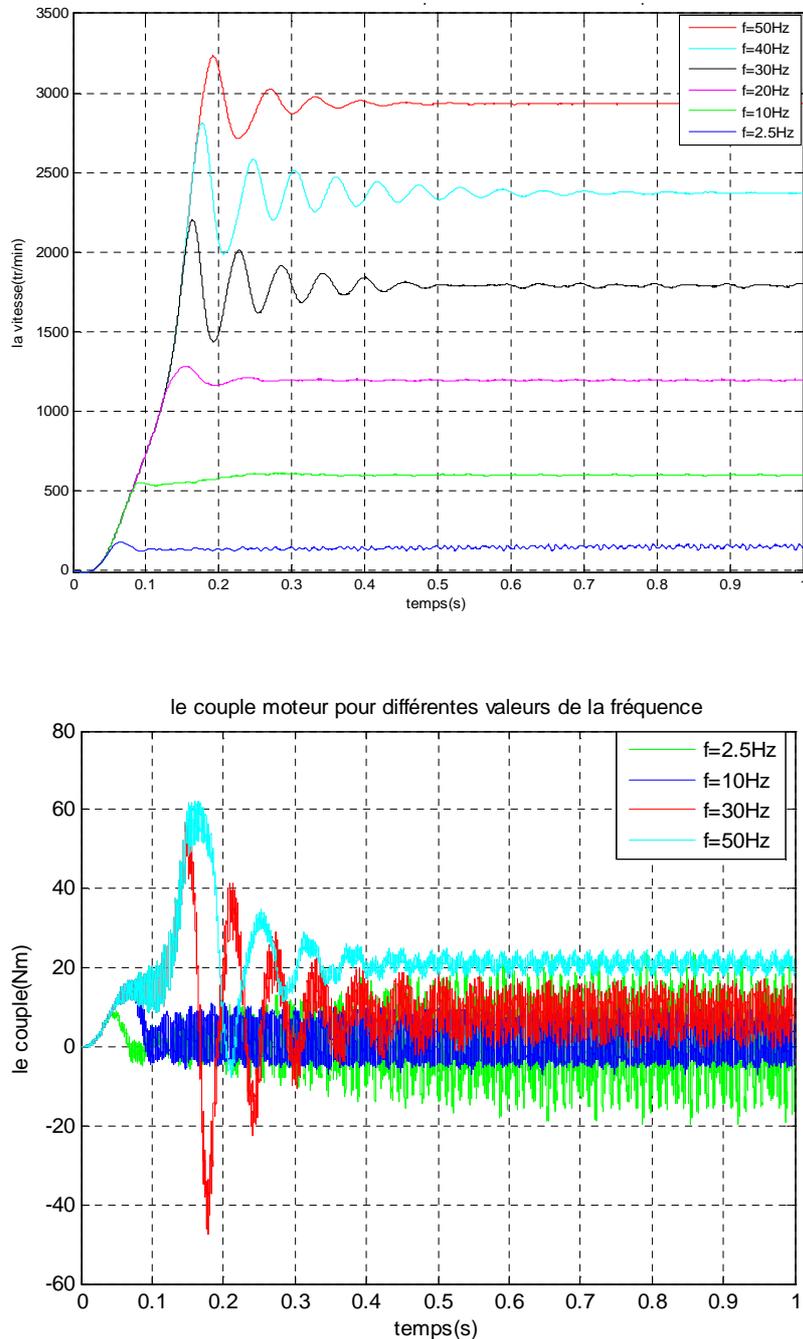
La vitesse nominale est acquise au bout de 0.4s pour une fréquence d'alimentation de 50Hz et la pompe centrifuge tourne à une vitesse de 2215 tr/min durant son régime permanent.

Lors de démarrage du moteur, le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de 60Nm. Durant son régime permanent, ce couple se stabilise à une valeur de 20Nm. Par ailleurs, l'allure du couple électromagnétique présente des ondulations dues à la présence de l'onduleur MLI. La forme de la tension de sortie d'une phase statorique est représentée sur la figure (IV-8).

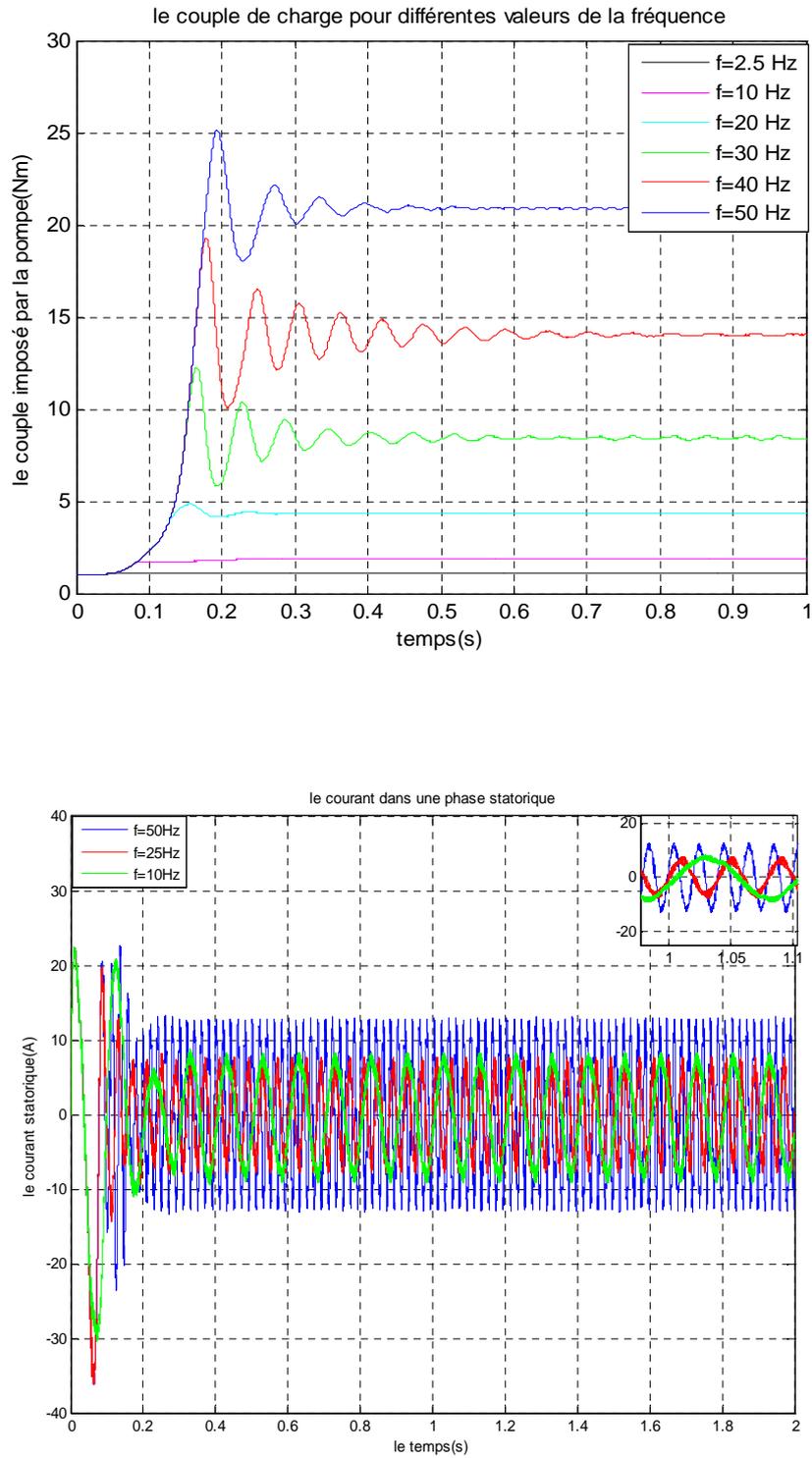
Le débit fourni par la pompe atteint un pic de  $118\text{m}^3/\text{h}$  en régime transitoire avant de se stabiliser à un débit de  $89\text{m}^3/\text{h}$  au régime permanent. Notons que la puissance absorbée par la pompe est de 6000W.

### ➤ Les résultats de simulation pour différentes valeurs de la fréquence d'alimentation

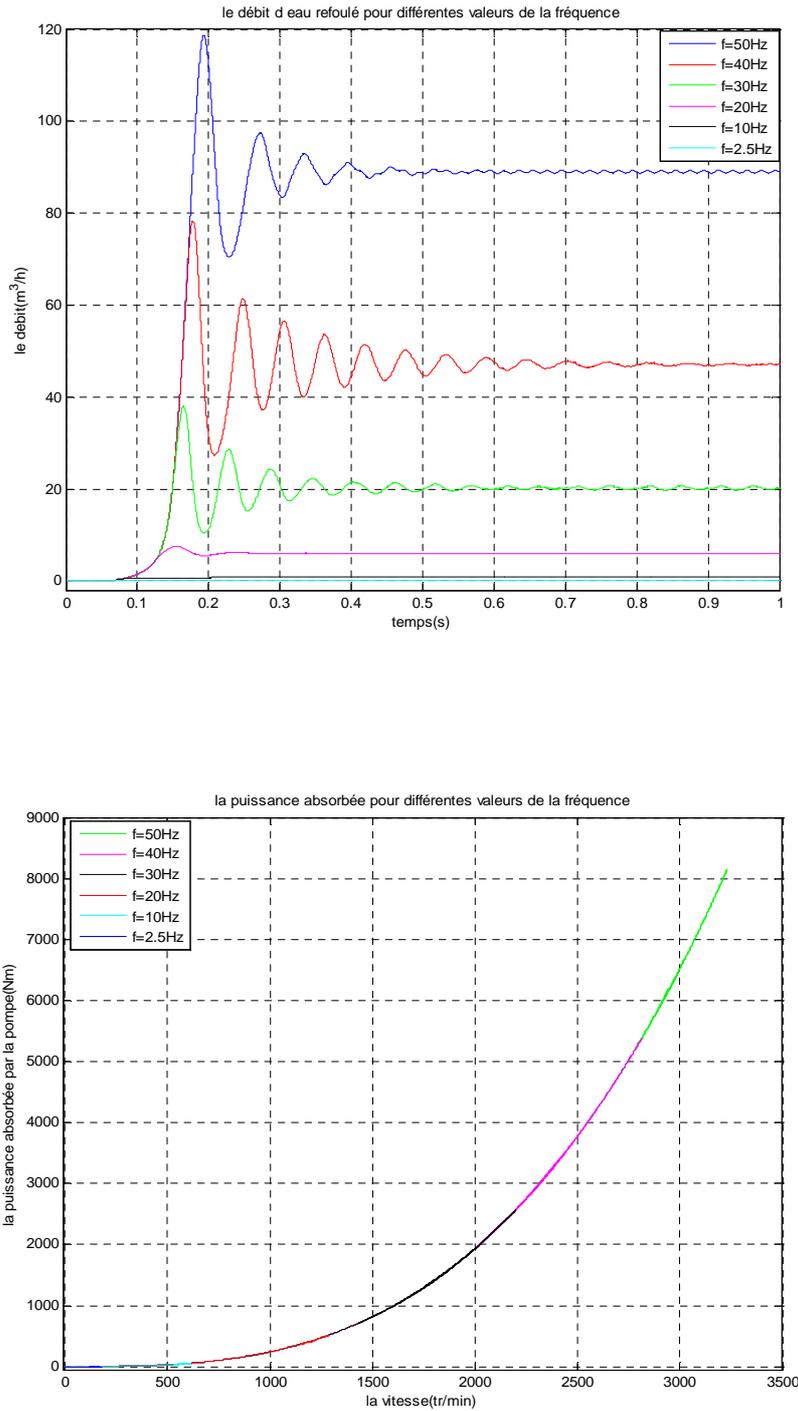
Les résultats de simulation du système d'entraînement pour différentes valeurs de la fréquence sont représentés sur les figures suivantes :



**Figure IV.11** : la variation de la vitesse du moteur et le comportement du couple électromagnétique pour différentes valeurs de la fréquence.



**Figure IV.12** : le comportement du couple charge et la forme due courant dans une phase statorique.



**Figure IV.13** : la variation du débit et de la puissance pour différentes valeur de fréquence d'alimentation.

### ➤ **Interprétation des résultats**

L'influence de la variation de fréquence d'alimentation sur les caractéristiques du moteur et de la pompe est illustrée sur les figures (IV.11), (IV.12) et (IV.13).

Nous remarquons que les oscillations de vitesse et du couple résistant diminuent en augmentant la fréquence d'alimentation, contrairement aux premiers pics du régime transitoire qui sont plus importants pour les faibles fréquences.

Pour les faibles fréquences d'alimentation le couple électromagnétique est fortement ondulé, ce qui engendre des vibrations du moteur. Le courant statorique augmente en fait et à mesure qu'on augmente la fréquence d'alimentation.

En régime transitoire, on note de fortes variations du débit d'eau suite à la variation de vitesse d'entraînement de la pompe en ce régime. Ce dernier n'est pas maîtrisé par le contrôle « V/f constant » (commande scalaire) qui ne tient compte que du régime permanent.

La variation de la puissance absorbée par la pompe en fonction de la vitesse d'entraînement du moteur est représentée sur la figure (IV.13). Pour les faibles fréquences, le moteur tourne avec de faibles vitesses, par conséquent, la pompe absorbe moins d'énergie. Notons qu'à mi-vitesse, la puissance absorbée par la pompe est de l'ordre de 800 W.

### **IV-5-3-Résultats de simulation pour une vitesse de référence de 50% de la vitesse nominale**

Dans le but de tester le comportement du système d'entraînement à une vitesse désirée, on fixe la vitesse de référence à 1500 tr/min et les résultats de simulations obtenus sont représentés sur les figures suivantes :

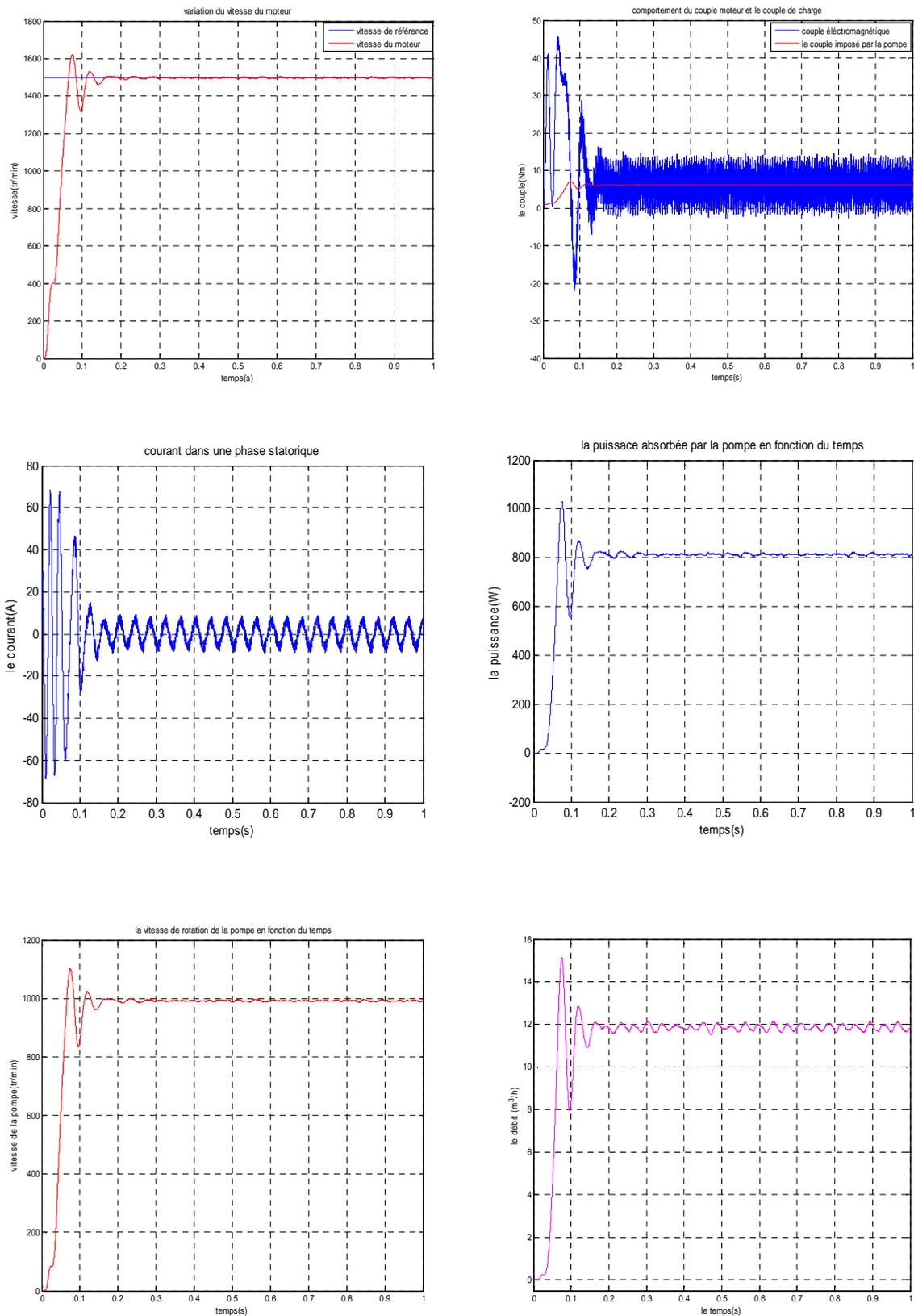


Figure IV.14 : Résultats de simulation pour une vitesse de rotation de 1500 tr/min.

### ➤ **Interprétation des résultats**

La figure (IV.14) illustre les caractéristiques du moteur et de la pompe pour une vitesse de référence de 1500 tr/min.

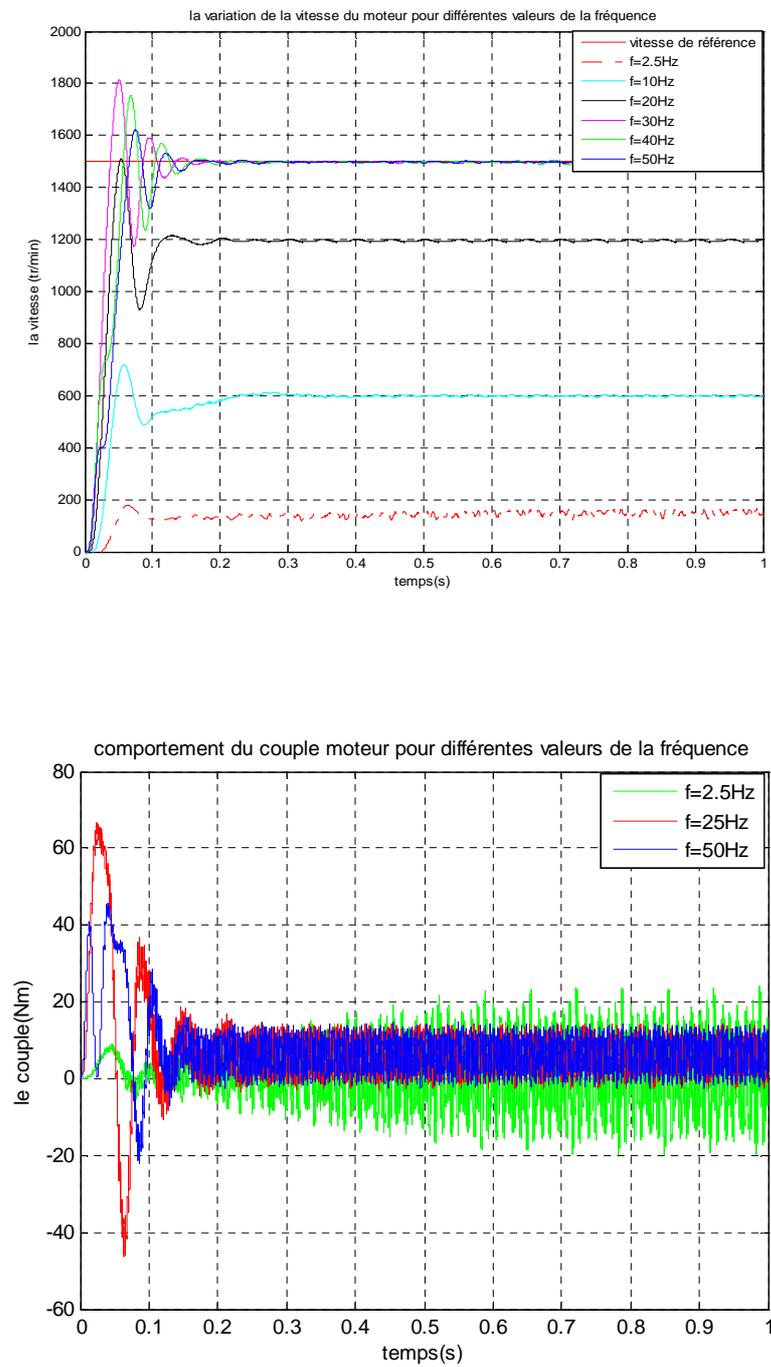
La vitesse du moteur suit parfaitement sa consigne sans dépassement montrant l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse. Notons que l'allure du couple électromagnétique présente des ondulations importantes durant son régime permanent.

La pompe tourne à une vitesse de 1000 tr/min pendant le régime permanent, elle impose un couple de charge qui dépend de la vitesse d'entraînement du moteur. Ainsi, nous avons noté un débit de  $11,9\text{m}^3/\text{h}$ , ce qui montre l'influence de la variation de vitesse sur le débit refoulé par la pompe.

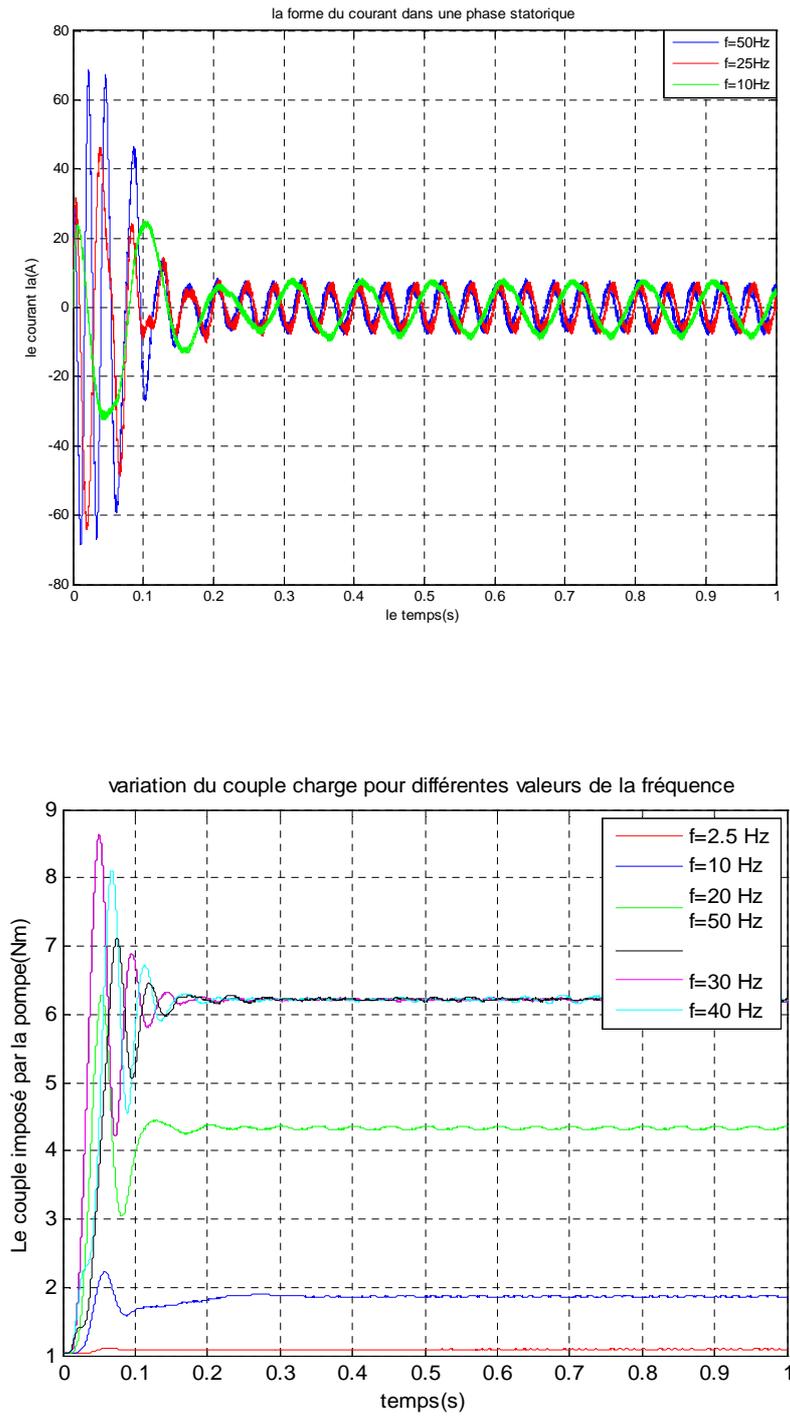
La puissance absorbée par la pompe est beaucoup moins importante dans ce cas, elle est de l'ordre de 800W.

### ➤ **Les résultats de simulation pour différentes valeurs de fréquence d'alimentation**

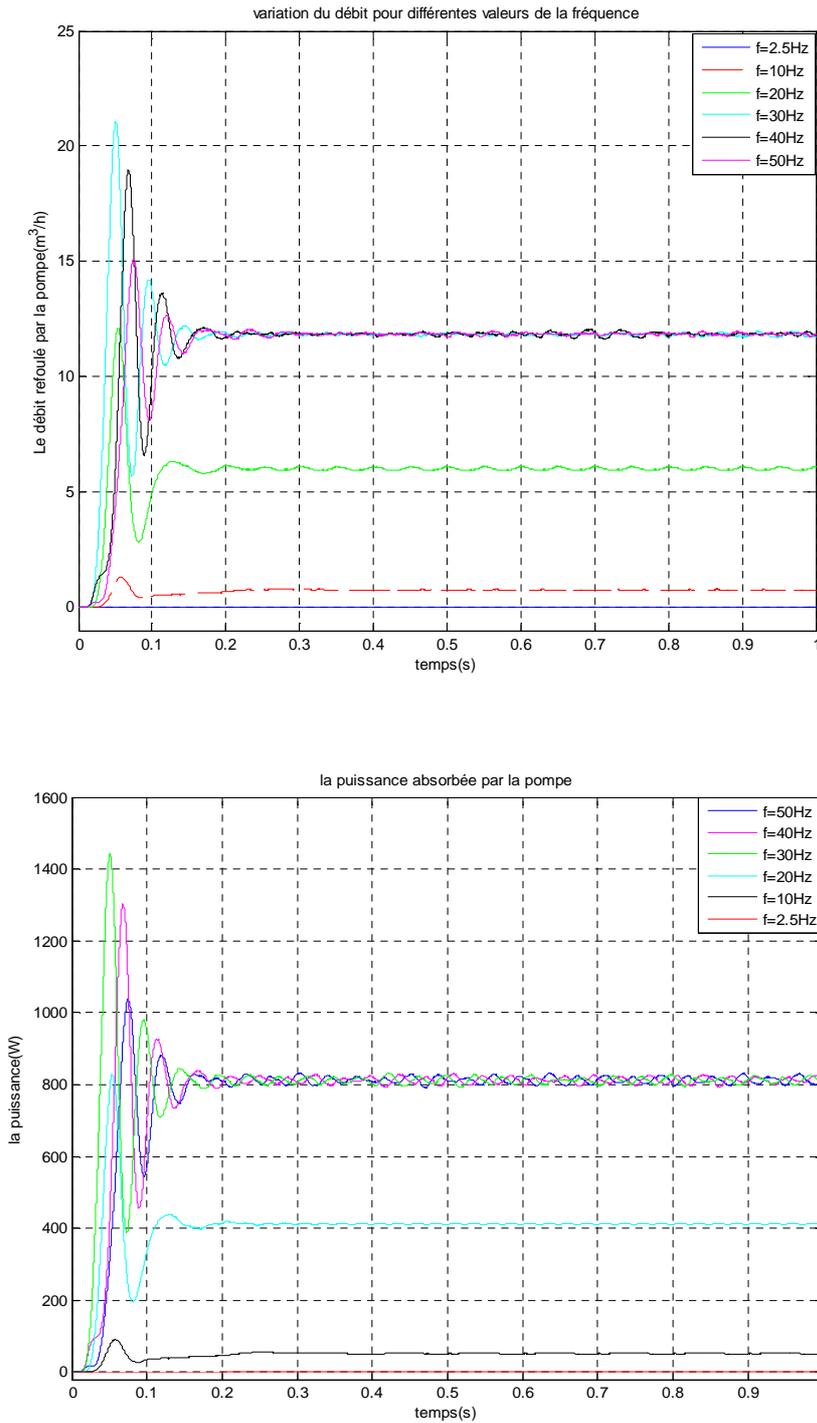
On fixe la vitesse de référence à 1500tr/min et on varie la fréquence d'alimentation entre 2,5 et 50 Hz, on aura les résultats de simulation présentés sur les figures ci-après :



**Figure IV.15** : représentation de la vitesse du moteur et le comportement du couple électromagnétique.



**Figure IV.16** : la forme du courant et le comportement du couple de charge imposé par la pompe.



**Figure IV.17** : variation de débit refoulé par la pompe et la puissance absorbée par la pompe.

#### ➤ Interprétation des résultats

Sur les figures (IV-15), (IV-16) et (IV-17) nous avons représenté, respectivement, l'évolution de la vitesse de rotation du moteur, la variation du couple résistant imposé par la pompe centrifuge et la variation de la puissance absorbée par la pompe en fonction de la vitesse d'entraînement pour différentes valeurs de la fréquence d'alimentation.

La vitesse du moteur atteint la vitesse de référence imposée ( $W_{ref}=1500$  tr/min) pour une fréquence de 30Hz. Au-delà de cette fréquence (pour  $f= 40$  et 50Hz) la vitesse du moteur ne change pas. Par ailleurs, nous remarquons que les premiers pics en régime transitoire sont d'autant plus importants pour les faibles fréquences.

Le débit refoulé se stabilise à une valeur de  $11,9$  m<sup>3</sup>/h en régime permanent, et ceci pour une fréquence d'alimentation de 30 Hz et la puissance absorbée par la pompe ne dépasse pas 820W.

En effet, la variation de vitesse permet d'adapter en permanence la puissance de la pompe aux besoins de l'installation. Lorsque le débit et la vitesse augmentent de façon linéaire, la hauteur manométrique augmente avec le carré de la vitesse, selon la loi de similitude. En raison de ces lois hydrauliques, une faible variation de vitesse permet, donc, de couvrir une plage de fonctionnement importante.

#### **IV-6-Conclusion**

L'élaboration du système de commande de l'entraînement électrique, la synthèse de régulateur de vitesse et les calculs des paramètres du variateur de vitesse ont été effectués, dans ce chapitre. Cependant, les résultats de simulation obtenus, pour deux vitesses de référence différentes et pour les différentes valeurs de la fréquence d'alimentation, ont été représentés. Ainsi nous avons noté le bon suivi de la vitesse de référence, montrant l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse.

## **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

L'objectif, de ce travail étant l'étude du système de commande automatique appliqué à l'entraînement électrique d'une station de pompage d'eau chaude. Le système d'entraînement électrique étudié est constitué, principalement, d'un variateur de fréquence et d'un moteur asynchrone accouplé à une pompe centrifuge.

Dans une station de pompage, il est nécessaire d'adapter le débit, fourni par la pompe, à la demande en eau. La solution adéquate est d'agir sur la vitesse d'entraînement de la pompe. La vitesse variable permet le maintien du rendement maximal, à tous les instants de fonctionnement, et la réduction des coups de bélier. Ces derniers sont très fortement réduits, voire éliminés, lorsqu'on prend soin de diminuer lentement la vitesse jusqu'à l'annulation du débit avant chaque arrêt de la pompe.

Nous avons commencé notre travail par une description générale des différents éléments constitutifs de la station de pompage d'eau chaude, ainsi que les systèmes de contrôle utilisés. L'acquisition des informations sur l'état de l'installation et sur l'évolution de certaines grandeurs caractéristiques est assurée par des capteurs (capteurs de vitesses, pression, température). Cependant, il est important de déterminer d'une façon précise les besoins en eau chaude qui conditionnent : le choix de mode de production d'eau chaude et le choix du groupe électropompe.

Le choix préliminaire du moteur, selon la gamme normalisée des puissances, était le point de départ de notre étude. Afin de valider ce choix et d'assurer un fonctionnement normal au système d'entraînement, la vérification de critère de surcharge du moteur était indispensable. Pour cela, un calcul du couple thermique équivalent est effectué en se basant sur le diagramme de charge du couple moteur. Par la suite, nous avons calculé les paramètres du schéma équivalent suivi par la construction de la caractéristique mécanique de la machine, et celle du groupe électropompe qui nous a permis de déterminer le point de fonctionnement de ce dernier.

Par ailleurs, le modèle de la machine asynchrone, basé sur la transformation de Park, était présenté, et les résultats de simulation obtenus montrent bien la validité de ce modèle pour la détermination des différentes caractéristiques de la machine à vide et en charge.

L'analyse des caractéristiques dynamiques du système d'entraînement étudié, en se basant sur les résultats de simulation obtenus, a fait l'objet du dernier chapitre. Les différents

paramètres du circuit de puissance ont été déterminés, et la synthèse du régulateur de vitesse a été effectuée.

L'entraînement à vitesse variable d'un système de pompage d'eau permet de contrôler le débit et la hauteur manométrique de la pompe. Afin de pouvoir régler la vitesse du moteur, un variateur de fréquence commandé par la loi « V/f constant » a été mis en place. Par ailleurs, il revient à la régulation de maintenir la vitesse de rotation constante, la dynamique et la précision n'étant pas des paramètres de première importance, une simple commande V/f est alors suffisante.

En absence de régulation de vitesse, la simulation du groupe électropompe branché directement au réseau montre que la puissance absorbée reste constante sur toute la plage de fonctionnement.

Les résultats de simulation obtenus, du groupe électropompe associé au variateur de fréquence, montrent que la variation de vitesse du moteur, par action sur la fréquence d'alimentation, entraîne la variation du couple résistant imposé par la pompe centrifuge ce qui permet d'adapter en permanence la puissance de la pompe aux besoins de l'installation. Selon la loi de similitude, le débit fourni par la pompe est toujours proportionnel à la vitesse d'entraînement. En raison de ces lois hydrauliques, une faible variation de vitesse permet alors de couvrir une plage de fonctionnement importante. En effet, le rapport V/f est automatiquement réglé en fonction de la charge ce qui permet d'économiser l'énergie et de réduire le bruit de fonctionnement pour les faibles charges.

La loi de commande « V/f constant » donne des résultats satisfaisants malgré sa mauvaise réponse transitoire (incapacité à contrôler les régimes dynamiques de la charge) et les faibles oscillations du couple et de la vitesse dues à la fréquence de découpage à laquelle est réalisée la modulation de largeur d'impulsion de l'onduleur.

Comme perspectives pour ce travail, on propose:

1. Etude du système en tenant compte de la flexibilité de l'accouplement entre le moteur et la pompe centrifuge,
2. Amélioration de cette stratégie de commande en appliquant : une commande par retour d'état.

## **Annexes**

## Annexe A

### I -Les paramètres du moteur asynchrone

Le type du moteur : 4A 11 2M2Y3,

Degré de protection : IP44.

Puissance nominale	7,5 kW
Vitesse synchrone	3000 tr/min
Glissement nominale	2,6%
Rendement nominal	87,5%
Facteur de puissance nominal	$\cos\varphi = 0,88$
$C_{\max}/C_n$	2,2
$C_d/ C_n$	2
Glissement critique (maximal)	17%
Coefficient de multiplicité du courant de démarrage	$I_d/I_n = 7,5$
Moment d'inertie du moteur	0,01 kg. m <sup>2</sup>
Réactance statorique	$X_1 = 0,864 \Omega$
Réactance rotorique	$X'_2 = 2,087 \Omega$
Résistance rotorique	$R'_2 = 0,417 \Omega$
Résistance statorique	$R_1 = 1,686 \Omega$
Réactance magnétique	$X_\mu = 55,149 \Omega$

### Paramètres du variateur de vitesse

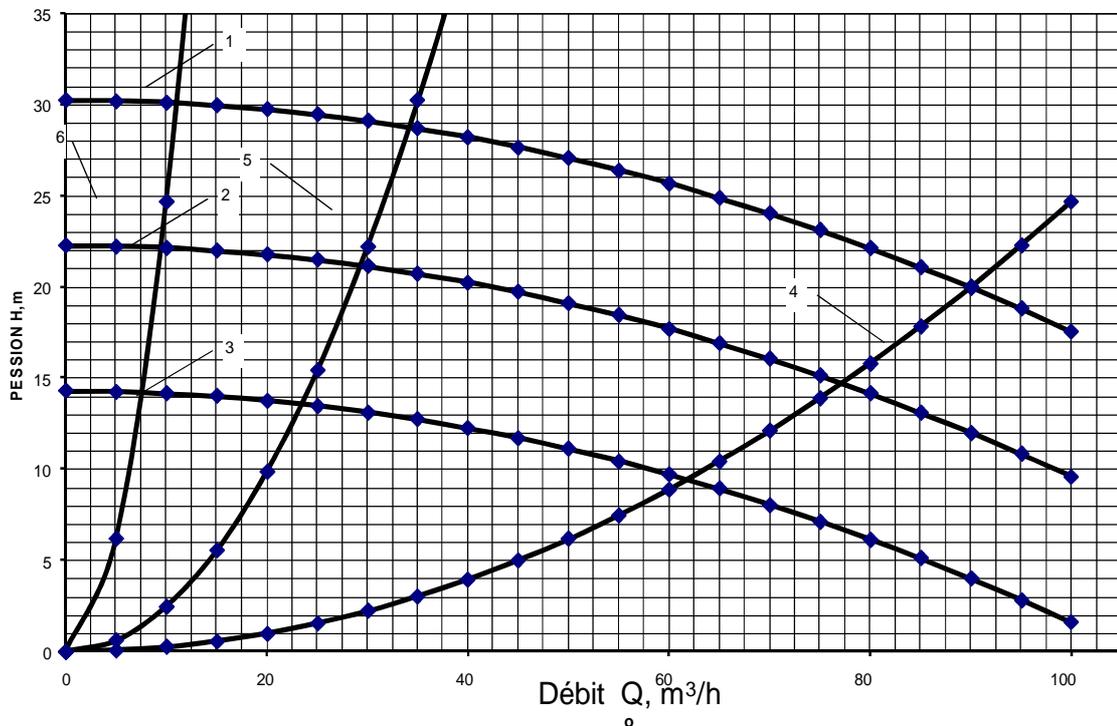
Dans ce travail, le moteur est alimenté par un variateur de fréquence, du type REN, ayant pour paramètres :

- Tension d'alimentation : 380 <sup>-</sup>10% V, 50<sup>+</sup>-1% Hz

- Gamme de régulation de la fréquence : de 2,5 à 50 Hz

## Caractéristique statique de la pompe et le réseau d'eau

La pompe est de type K90/20 :



- |     |  |     |  |
|-----|--|-----|--|
| 1 – | Caractéristique de la pompe à $n = 2900$ tr/min; | 4 – | Caractéristique du réseau à $R = R_b$ ;    |
| 2 – | Caractéristique de la pompe à $n = 2489$ tr/min; | 5 – | Caractéristique du réseau à $R = 10R_b$ ;  |
| 3 – | Caractéristique de la pompe à $n = 1993$ tr/min; | 6 – | Caractéristique du réseau à $R = 100R_b$ ; |

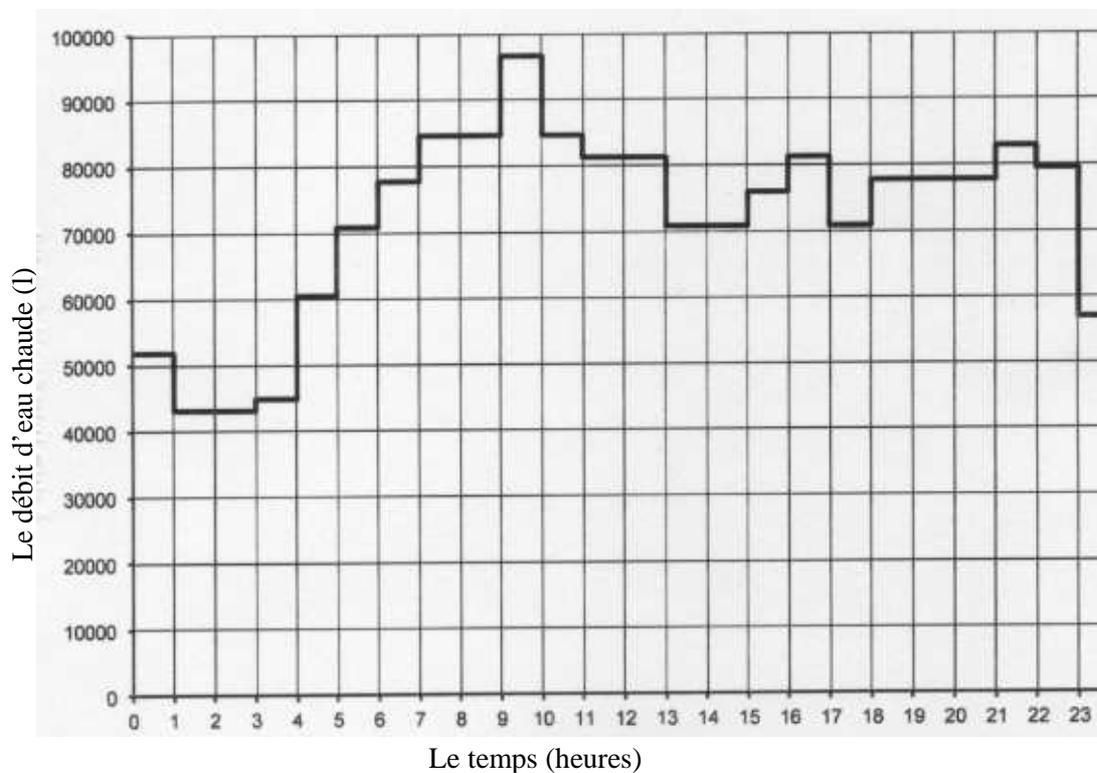
Lors de la détermination de la puissance du moteur, on applique les marges de majoration suivantes [39]:

- |   |                           |          |
|---|---------------------------|----------|
| { | 20% jusqu'à 7,5 kw ;      | (k=1,2)  |
|   | 15% de 7,5 à 40 kw ;      | (k=1,15) |
|   | 10% de 40 à 100kw ;       | (k=1,1)  |
|   | 5 à 10% au-delà de 100kw. | (K=1,05) |

Exemple de distribution de débit journalier d'eau chaude par heure (pour une consommation moyenne de 20 l/s et coefficient d'irrégularité d'écoulement  $K_{ie} = 1,3$ )

Heure/jour	Débit horaire,%	Heure/jour	Débit horaire,%
0.1	3	12.13	4,7
1.2	2,5	13.14	4,1
2.3	2,5	14.15	4,1
3.4	2,6	15.16	4,4
4.5	3,5	16.17	4,7
5.6	4,1	17.18	4,1
6.7	4,5	18.19	4,5
7...8	4,9	19.20	4,5
8.9	4,9	20.21	4,5
9.10	5,6	21.22	4,8
10.11	4,9	22.23	4,6
11..12	4,7	23...24	3,3

Histogramme de débit d'eau en fonction du temps (le débit d'eau puisée pendant 24 heures)



**Tableau récapitulatif des calculs utilisés pour le tracé des diagrammes de vitesse et du couple :**

le temps(h)	débit (%)	le débit (l/h)	le débit (l/s)	$\Omega_p$ (tr/min)	$C_p$ (Nm)	$\Omega_m$ (tr/min)	$C_m$ (Nm)
0-1	3	52173	14,4925	1681,13	35,79254	3880,31429	17,9807
1-2	2,5	43477,5	12,07708	1400,94167	42,95105	4261,2303	16,37339
2-3	2,5	43477,5	12,07708	1400,94167	42,95105	4261,2303	16,37339
3-4	2,6	45216,6	12,56017	1456,97933	41,29909	4176,41135	16,70592
4-5	3,5	60868,5	16,90792	1961,31833	30,67932	3583,52679	19,46986
5-6	4,1	71303,1	19,80642	2297,54433	26,18967	3301,00481	21,13622
6-7	4,5	78259,5	21,73875	2521,695	23,8617	3144,53461	22,18795
7-8	4,9	85215,9	23,67108	2745,84567	21,9138	3007,36127	23,2
8-9	4,9	85215,9	23,67108	2745,84567	21,9138	3007,36127	23,2
9-10	5,6	97389,6	27,05267	3138,10933	19,17458	2803,12701	24,89034
10-11	4,9	85215,9	23,67108	2745,84567	21,9138	3007,36127	23,2
11-12	4,7	81737,7	22,70492	2633,77033	22,8463	3073,79327	22,69859
12-13	4,7	81737,7	22,70492	2633,77033	22,8463	3073,79327	22,69859
13-14	4,1	71303,1	19,80642	2297,54433	26,18967	3301,00481	21,13622
14-15	4,1	71303,1	19,80642	2297,54433	26,18967	3301,00481	21,13622
15-16	4,4	76520,4	21,25567	2465,65733	24,40401	3181,67262	21,92896
16-17	4,7	81737,7	22,70492	2633,77033	22,8463	3073,79327	22,69859
17-18	4,1	71303,1	19,80642	2297,54433	26,18967	3301,00481	21,13622
18-19	4,5	78259,5	21,73875	2521,695	23,8617	3144,53461	22,18795
19-20	4,5	78259,5	21,73875	2521,695	23,8617	3144,53461	22,18795
20-21	4,5	78259,5	21,73875	2521,695	23,8617	3144,53461	22,18795
21-22	4,8	83476,8	23,188	2689,808	22,37034	3040,06666	22,95041
22-23	4,6	79998,6	22,22183	2577,73267	23,34296	3108,59615	22,44446
23-24	3,3	57390,3	15,94175	1849,243	32,53868	3694,2093	18,88652

### Les calculs effectués dans ce travail

La puissance préliminaire du moteur d'entraînement :  $P_m = 7,71 \text{ kW}$

Le couple thermique équivalent du moteur :  $C_{th} = 21,77 \text{ Nm}$

Le couple nominale du moteur est :  $C_m = 24,51 \text{ Nm}$

Paramètres du schéma équivalent	Leur valeur
Impédance du court circuit	$Z_c = 1,987 \Omega$
Facteur de puissance au démarrage	$\cos\varphi_d = 24$
Résistance active du court circuit	$R_c = 0,484 \Omega$
Réactance du court circuit	$X_c = 1,927 \Omega$
Courant à vide	$I_0 = 5,024 \text{ A}$
Courant nominal	$I_n = 14,75 \text{ A}$
Pertes d'aimantation	$\Delta P_{st} = 171,43 \text{ W}$
Résistance active de la constante d'aimantation	$R_\mu = 2,26 \Omega$
Constante de temps électromagnétique du moteur	$T_e = 0,018 \text{ s}$

- La vitesse nominale du moteur :

$$\omega_n = 305,99 \frac{rd}{s}$$

- Le couple nominal de la pompe :

$$c_{pn} = 20,75 \text{ Nm}$$

- Le couple de la pompe ( $C_p$ ) :  $C_p = c_0 + K \Omega^2$

$$K = 2,1 \times 10^{-4} \text{ (constante).}$$

- le couple «  $c_0$  » déterminé par les forces de friction dans le mécanisme, on le prend égal à 5% du couple nominal de la pompe.

$$c_0 = 1,0375$$

### **Calcul des paramètres du variateur de fréquence**

1. puissance d'entrée du variateur :  $P_{ent} = 9,5 \text{ kW}$
2. courant d'entrée de phase du variateur :  $I_{ent} = 15,19 \text{ A}$
3. chute de tension admissible :  $\Delta U_{adm} = 6,6 \text{ V}$
4. réactance inductive :  $X_1 = 0,44 \Omega$

### **Calcul de l'inductance du filtre $L_1$ : $L_1 = 0,0014 \text{ H}$**

1. puissance dissipée dans L1 :  $\sigma_{p1} = 0,19 \text{ kW}$
2. puissance du variateur :  $P_{conv} = 9,31 \text{ kW}$
3. courant à la sortie du variateur :  $I_{sort} = 11,96 \text{ A}$
4. réactance :  $X_2 = 0,55 \Omega$

### **Calcul de l'inductance du filtre $L_2$ : $L_2 = 0,0018 \text{ H}$**

1-puissance dissipée dans L2:  $\sigma_{p2} = 0,15 \text{ kW}$

➤ **Calcul des paramètres du régulateur « PI » :**

$K_p = 0,04$  ;

$K_i = 0,3782$  ;

## ANNEXE B

### I-Protection du moteur contre les surcharges

La surcharge est le défaut le plus fréquent sur les moteurs. Elle se manifeste par une augmentation du courant absorbé par le moteur et par des effets thermiques. La classe d'isolation détermine l'échauffement normal d'un moteur à une température ambiante de 40°C. Tout dépassement de la température limite de fonctionnement conduit à une réduction de la durée de vie par vieillissement prématuré des isolants.

Les conditions réelles d'emploi (température ambiante, altitude d'utilisation et service normalisé) sont essentielles pour déterminer les valeurs d'emploi du moteur (puissance, courant) et pour pouvoir choisir une protection efficace contre les surcharges. Ces valeurs d'emploi sont fournies par le constructeur du moteur.

Les valeurs du tableau ci-dessus sont données à titre indicatif. En effet, le déclassement d'un moteur est fonction de sa taille, de sa classe d'isolation, du mode de construction (moteur auto ventilé ou moto ventilé, degré de protection IP 23, IP 44, etc.), et varie suivant les fabricants.

La valeur de puissance nominale qui apparaît généralement sur la plaque signalétique d'un moteur est définie par le constructeur pour un service continu S1 (fonctionnement à régime constant et d'une durée suffisante pour atteindre l'équilibre thermique). Il existe d'autres services normalisés, tel que le service temporaire S2, ou les services intermittents périodiques S3, S4, et S5 pour lesquels le constructeur d'un moteur définit, dans chaque cas, une puissance d'emploi différente de la puissance nominale

Altitude m	Température ambiante						
	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C
1000	1.07	1.04	1.00	0.96	0.92	0.87	0.82
1500	1.04	1.01	0.97	0.93	0.89	0.84	0.79
2000	1.01	0.98	0.94	0.90	0.86	0.82	0.77
2500	0.97	0.95	0.91	0.87	0.84	0.79	0.75
3000	0.93	0.91	0.87	0.84	0.80	0.76	0.71
3500	0.89	0.86	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68
4000	0.83	0.81	0.78	0.75	0.72	0.68	0.64

Tableau.1 : Coefficients de déclassement des moteurs selon leurs conditions d'emploi.

Selon le niveau de protection souhaité, la protection contre les surcharges peut-être réalisée par des relais de surcharge, thermique (bilames) ou électroniques, qui au minimum protègent les moteurs dans les cas suivants :

- surcharge : par le contrôle du courant absorbé sur chacune des phases,
- déséquilibre ou absence de phases : par son dispositif différentiel,

## Annexe C

### **I-Régimes transitoires ou coups de bélier dans une station de pompage**

Les régimes transitoires dépendent directement de variations brutales de la vitesse d'écoulement dans la conduite. Ces variations de vitesse sont à l'origine de variations de pression (également appelées coups de bélier) qui peuvent être positives ou négatives.

#### ➤ **Origines des coups de bélier**

Les régimes transitoires ou coups de bélier ont des causes très diverses, à titre d'exemple on peut citer :

- disjonction électrique,
- manœuvre rapide d'ouverture ou de fermeture d'un robinet-vanne,
- fin de remplissage d'une conduite,
- implosion d'une poche de cavitation,
- arrêt et démarrage d'une pompe.

Dans le cas d'une station de pompage, les régimes transitoires les plus dangereux sont consécutifs à une disjonction électrique (ou panne de courant).

### **II-Problème de prolifération des bactéries dans l'eau chaude**

Il existe différentes solutions afin d'éviter la prolifération des légionelles mais les deux solutions les plus efficaces à ce jour sont la mise en place d'une microfiltration de 0.01 micromètres à l'entrée du réseau d'eau froide et éventuellement la pasteurisation de l'eau froide. Meskel et Carlier proposent de traiter directement l'eau froide [14]. La bactérie étant présente dans l'eau froide, elle peut contaminer le réseau lorsque l'eau de consommation est mitigée à 55°C, puisque la bactérie vit environ une demi-heure à cette température. En traitant l'eau froide, cette eau est débarrassée des bactéries et elle peut être consommée en toute sécurité. La température du retour de bouclage peut ainsi être inférieure à 50°C (température minimum actuellement imposée par la réglementation).

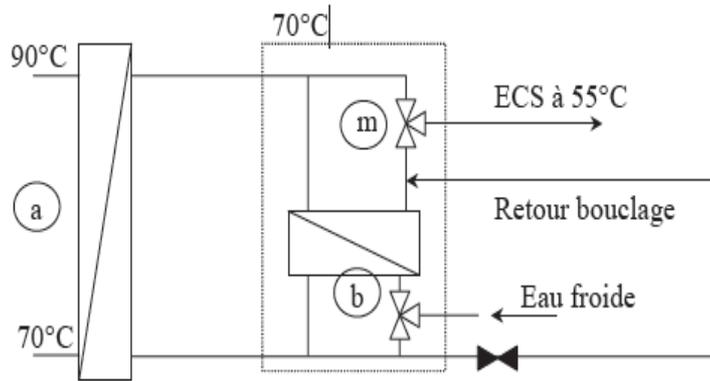


Figure.4 : Schéma hydraulique d'une installation d'ECS avec traitement de l'eau froide

Cependant, la température du ballon doit être de l'ordre de 70°C pour assurer la destruction des bactéries. Le schéma de la figure.4 a été proposé pour assurer le traitement de l'eau froide dans les installations de puissances importantes [14]. La vanne «3 voies» de dérivation à l'entrée froide de l'échangeur «b» assure le passage de l'eau froide dans l'échangeur (fonctionnement normal) pour un traitement thermique. Cette eau est ensuite chauffée à 70°C en passant sur l'échangeur «a» pour éliminer les bactéries. A 70°C, cette eau chaude sanitaire ne peut pas être consommée, c'est pourquoi une partie de celle-ci passe à nouveau dans l'échangeur «b» pour y être refroidie. Le débit passant dans ce dernier est imposé par le mitigeur thermostatique «m» telle que la température à la sortie soit de 55°C.

### III-Uniformisation des températures de l'eau chaude puisée

Il est évident que la température de l'eau puisée varie en fonction du type de puisage.

Pour faciliter les calculs et permettre l'addition de volumes puisés à des températures différentes, tous les volumes quelconques  $V_x$  à une température quelconque  $T_x$  seront convertis en des volumes d'eau équivalents à 60°C par l'expression suivante:

$$V_{60} = V_x \frac{T_x - 10^\circ}{60^\circ - 10^\circ}$$

Dans cette expression, 10° représente la température de l'eau froide.

Dans la pratique, la température de l'eau puisée, n'est pas connu exactement, on considère :

- pour les cuisines :  $T_x = 55^\circ\text{C}$ ,
- pour les sanitaires :  $T_x = 45^\circ\text{C}$ ,
- si les volumes puisés sont mesurés par compteur sur l'alimentation en eau froide de l'appareil de production ;  $T_x$  est la température de l'eau chaude dans le ballon ou à la sortie de l'échangeur.

Dans les calculs, pour tenir compte du degré de stratification des ballons, on considère une température minimum possible du stock de 10° et on y associe un coefficient d'efficacité 'a'. Dans la plupart des cas courants, celui-ci prend une valeur de 0,8 à 0,95, ce qui signifie que 80 à 95% du volume réel du ballon est utilisable pour la température voulue. Si on se trouve dans le cas d'un ballon avec mélange important, 'a' peut descendre jusqu'à 0.45.

### **Dimensionnement en préparation instantanée**

Un système de production d'ECS instantané ne comporte pas de volume de stockage. Son dimensionnement consiste à déterminer la puissance du générateur (production directe) ou de la chaudière et de l'échangeur (production indirecte).

En pratique, cette puissance correspond à la puissance nécessaire pour subvenir aux besoins maximum en 10 minutes.

#### **➤ Energie maximale puisée en 10 minutes**

Il s'agit de déterminer le volume d'eau maximum (équivalent à 60°C) puisé en 10 minutes durant la journée la plus chargée de l'année. L'énergie maximale puisée en 10 minutes via l'eau chaude est alors déterminée par la formule:

$$E_{inst} = 1,16 V_{60inst}(60^{\circ} - 10^{\circ})/1000$$

$E_{inst}$  : énergie maximale puisée en 10 minutes en kWh,

$V_{60inst}$  : volume, ramené à 60°, maximum puisé en 10 minutes en litres,

1,16/1000 : coefficient de correspondance,

10° : température de l'eau froide.

#### **➤ Puissance de la production**

La puissance (en kW) de l'échangeur (ou du générateur) est :

$$\text{Puissance} = E_{inst} \times 6 + P_{dis}$$

Avec  $P_{dis}$  est les pertes dans le réseau de distribution. Dans le cas d'une boucle de distribution, il s'agit de la puissance de maintien en température de celle-ci.

### Préparation en accumulation pure

- **Energie maximale puisée**

$$E_{acc} = 1,16 V_{60acc}(60^{\circ} - 10^{\circ})/1000$$

$E_{acc}$  : énergie puisée durant une journée entière en kWh,

$V_{60acc}$  : volume d'eau chaude total puisé durant une journée, toutes utilisations confondues, ramené à 60°C, en litres,

1,16/1000 : coefficient de correspondance,

10° : température de l'eau froide.

- **Le volume du ballon de stockage**, donné en litres, est :

$$\text{Volume} = \frac{1000 E_{acc}}{1,16 (T_{ec} - 10^{\circ}) a}$$

$T_{ec}$  : température de l'eau du ballon

- **La puissance de l'échangeur**, en kW, qui permet de reconstituer le stock d'eau chaude en 6 ou 8 heures, est donnée par la formule suivante :

$$\text{Puissance} = \frac{E_{acc}}{6 \text{ à } 8 \text{ h} \times 0,9} + P_{dis}$$

### Préparation semi-instantanée ou en semi-accumulation

Deux méthodes peuvent être appliquées :

- la méthode générale ou méthode graphique,
- la méthode algébrique applicable lorsque les puisages journaliers sont discontinus.

- **Profil de l'énergie puisée**

L'eau chaude consommée peut se traduire en énergie puisée. Le profil de puisage d'eau chaude peut donc être transformé en un profil d'énergie puisée au moyen de la formule suivante :

$$E = 1,16 V_{60}(60^{\circ} - 10^{\circ})/1000$$

$E$  : énergie contenue dans l'eau chaude en kWh,

$V_{60}$  : volume puisé en litre ramené à 60°C,

1,16/1000 : facteur de conversion,

10° : température de l'eau froide.

➤ **Volume de stockage et puissance de l'échangeur**

$$\text{Volume de stockage} = \frac{V_{60} (60^\circ - 10^\circ) t_r}{(T_{ec} - 10^\circ) a (t_r + t_p - 3)} \quad [\text{litres}]$$

$$\text{Puissance de l'échangeur} = \frac{1,16 a V (T_{ec} - 10^\circ)}{16,7 t_r} \quad [\text{kW}]$$

$V_{60}$  : volume puisé durant la période la plus critique, ramené à 60°C (en litres),

$V$  : volume du ballon de stockage (en litres),

$T_{ec}$  : température de l'eau stockée (en °C),

10° : température de l'eau froide et température minimale que peut atteindre le stock tout en garantissant le confort (en °C),

$a$  : coefficient d'efficacité du ballon de stockage,

$t_p$  : temps de puisage (en minutes),

3 : temps d'attente entre le début du puisage et la mise en action de l'échangeur (3 minutes en production directe et 5 minutes en production indirecte),

$P$  : puissance de l'échangeur (en kW),

16.7 : facteur de conversion d'unités,

$t_r$  : temps de reconstitution du stock entre 2 pointes de puisage (en minutes).

#### **IV-Isolation des ballons de production d'eau chaude**

L'épaisseur de l'isolant du ballon devrait être d'au moins 10 cm. Les Suisses vont même plus loin et recommandent, selon la contenance du ballon, de 10 à 14 cm d'épaisseur.

Contenance en litres	Epaisseur minimale de laine minérale en cm
<400	10
De 400 à 2000	12
>2000	14

## **Bibliographie**

- [1] C. CALON, M. CARLIER, B. GARNIER, « Les stations de pompage d'eau », édition Lavoisier, Paris, 2005.
- [2] M. ETIQUE, « Entraînement réglés », Cours, Haut Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canto de Vaude (HEIG-Vd), mars 2006.
- [3] J. BONAL, G. SEGIER, « Variable speed electric drives: Reminders on power and control electronics, Electronics variable speed drives », édition Lavoisier, Paris 2000.
- [4] B. K. BOSE, « Modern Power Electronics and AC Drives », édition Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [5] G. KOHLIRUSZ, D. FODOR, « Comparison of scalar and control strategies of induction motors », HUNGARIAN Journal, Vol. 39(2), pp. 265-270, 2011.
- [6] A. MUNOZ-GARCIA, T. A. LIPO, D. W. NOVOTNY, « A New Induction Motor V/f Control Method Capable of High-Performance Regulation at Low Speeds », IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 34, No. 4, July/ August 1998.
- [7] M. L. DOUMBIA, « Outil d'aide à la conception des systèmes d'entraînement de machines électriques: exemple d'application », Thèse de PHILOSOPHIAE DOCTOR, École polytechnique de Montréal, 2000.
- [8] J. RAYNAUD, « La pratique de l'eau », édition Moniteur, Paris 1981.
- [9] B. BERNHARD, O. BERTRAND, P. Y. BERTNARD, « Technique de traitement de l'eau dans les bâtiments », édition le Moniteur, Paris 2009.
- [10] J.L. CAUCHEPIN, « Le Recknagel: Manuel pratique de génie climatique - chauffage et production d'eau chaude sanitaire », édition PYC, Paris 1996.
- [11] J. LAUNAY, G. PERROTIN, « Liquides à pression moyenne: Stations de pompage », technique de l'ingénieur B4340.
- [12] N. MARY, « Reconversion du réseau de chaleur urbain de Strasbourg-Hautepierre », projet de fin d'étude, INSA. STRASBOURG, juin 2011.
- [13] Guide technique, « L'eau dans les établissements de santé », Direction générale de la Santé, juillet 2005, Disponible en ligne <http://www.sante.gouv.fr>
- [14] K. JOHANNES, « Optimisation des installations solaires collectives d'eau chaude sanitaire : application des techniques « des faibles débits » et « du stockage divisé » », Thèse de Doctorat en sciences, Université de SAVOIE, 2005.

- [15] Guide technique, «Guide au dimensionnement des appareils de production d'eau chaude sanitaire », Institut Wallon A.S.B.L.
- [16] Site internet, <http://www.ademe.fr>.
- [17] J. Y. MESSE, « Dimensionnement de la production Eau Chaude Sanitaire (ECS) », Guide technique, 2013.
- [18] Site internet, « Les terrasses rodin, production d'eau chaude », SDC.
- [19] Guide technique, « Réservoir de production et de stockage d'eau chaude sanitaire : Notice d'utilisation et d'installation », Lacaze Energie.
- [20] R. MASSE, « Prévention des cas des bruleurs et de légionelloses associés à l'eau chaude du robinet dans les résidences privées », Guide technique, Institut national de santé publique de Québec, juin 2003.
- [21] Guide technique, «Maîtrise du risque de développement des légionelles dans les réseaux d'eau chaude sanitaire», édition CSTB, France, Janvier 2012.
- [22] J. POULAIN, « Pompes rotodynamiques: Présentation, Description », Technique de l'ingénieur B4300.
- [23] A. LENCASTRE, « Hydraulique générale», édition Eyrolles, Paris 1996.
- [24] DJ. BOUKHERS, «Optimisation d'un système d'énergie Photovoltaïque application au Pompage », Thèse de magister, Université de Constantine, 2007.
- [25] Guide technique, « Régulation de pompes / Automatisation de pompes, savoir-faire », volume 4, édition K.S.B, janvier 2009.
- [26] M. DJERROUD, « Identification numérique des paramètres d'amélioration des performances d'une pompe centrifuge: roue, roue-volute et roue-diffuseur », Université du Québec, juin 2011.
- [27] Guide technique, « Systèmes de pompage: Les économies d'énergie électrique dans les systèmes de pompage », Hydro-Québec, 1993.
- [28] Site internet, « Pompe centrifuge pour eau chaude », [www.sterlingfluid.com](http://www.sterlingfluid.com),
- [29] B. FORNEL, « Alimentation des machines asynchrones », technique de l'ingénieur D3620.

- [30] J. P. ARTIÈRE, «Installations de pompage d'eau », guide technique, édition Média contacts création, Paris 2010.
- [31] P. MICHEL, « Commande Electronique des moteurs électriques », édition Dunod, Paris 2004.
- [32] C. LETRIONNAIRE, J. P. PICHENY, « Vade-mecum d'électrotechnique », édition Ellipses, Paris 2001.
- [33] Guide technique, « détermination des pompes centrifuges », Edition KSB Aktiengesellschaft, Allemagne, Novembre 2005.
- [34] K. NOURIA, H. LOUSSIFIA & N. B. BRAIEKA, « A comparative study on the identification of the dynamical model of multi-mass electrical drives using wavelet transforms», International Journal of Systems Science, 2014, Vol. 45, No. 11, 2223–2241.
- [35] T. ORLOWSKA-KOWALSKA, K. SZABAT, « Control of the Drive System With Stiff and Elastic Couplings Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach», IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, february 2007.
- [36] K. SZABAT, T. ORŁOWSKA-KOWALSKA and P. SERKIES, «Robust Control of the Two-mass Drive System Using Model Predictive Control», Wroclaw University of Technology, Poland, 2011.
- [37] K. E. OKEDU, « Effects of Drive Train Model Parameters on a Variable Speed Wind Turbine», International Journal of Renewable Energy Research, vol.2, no.1, 2012.
- [38] Guide technique, « Dimensionnement d'un système d'entraînement », ABB-Industriel, 2012.
- [39] Guide technique, « Les lois de l'hydrauliques appliquées au pompage », les cahiers pédagogique du thème 44, Centre de formation aux métiers de l'eau de Tizi-Ouzou.
- [40] Guide technique, « Installations De Pompage d'Eau », SNECOREP, Paris 2010.
- [41] E. PIERRÉ, « Essais des machines tournantes », Technique de l'ingénieur, D 3750.
- [42] Cahiers Techniques, « Démarrage et protection des moteurs », Schneider-Electric.
- [43] T.WILDI, G. SYBILLE, « Electrotechnique, 4<sup>e</sup> édition», De Boek, 2005.

- [44] E. CHAUVEAU, « Contribution au calcul électromagnétique et thermique des machines électriques : Application à l'étude de l'influence des harmoniques sur l'échauffement des moteurs asynchrones », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2001.
- [45] Cahier techniques, « Conception d'un automatisme : schéma de câblage et technologie de l'appareillage électromécanique », Centre de formation aux métiers de l'eau de Tizi-Ouzou.
- [46] T. ZIDANE, « Développement d'un outil numérique destiné à l'étude des performances dynamiques d'un entraînement électrique : application aux ascenseurs », Thèse de magister, Université de Tizi-Ouzou, 2010.
- [47] R. CHAIBI, « Théorie des entraînements électriques », Cours, Université de Tizi-Ouzou, 2012-2013.
- [48] P. MAYE, « Moteurs électriques industriels », édition Dunod, Paris 2005.
- [49] H. RAZIK, « La machine asynchrone à vitesse variable », édition Lavoisier, Paris 2006.
- [50] D. SATOR NAMANE, « Machine à courant alternatif », édition Elipses S-A, Paris 2010.
- [51] J. GHOUILI, « Commande sans capteur d'une machine asynchrone avec estimation de la vitesse par réseaux de neurones », Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Avril 2005.
- [52] H. BOUBACAR, « Prototypage rapide à base de FPGA d'un algorithme de contrôle avancé pour le moteur à induction », Université du Québec, Décembre 2010.
- [53] Kh. ABED, « Techniques de commande avancées appliquées aux machines de type asynchrone », Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Constantine, 2010.
- [54] C. CARLOS, « Modélisation, contrôle vectoriel et DTC : Commande des moteurs asynchrones », édition Hermes Science, Europe 2000.
- [55] F. LABRIQUE, G. SEGUIER, R. BAUSIERE, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance: la conversion continu-alternative », édition Lavoisier, Paris 1995.
- [56] J-P. LOUIS, C. BERGMANN, « Commande numérique des machines : Systèmes triphasés- régime permanent », Techniques de l'Ingénieur, D 3642.
- [57] G. GRELLET, G. CLEREC, « Actionneur électriques, principes modèles et commande », édition Eyrolles, France 2000.

- [58] R. CHAUPRADE, F. MILSANT, « Electronique de puissance : moteurs à courant alternatif », édition Eyrolles, Paris 1990.
- [59] S. MEZIANE, « Commande adaptative et prédictive de la machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2009.
- [60] C-C. WANG, C-H. FANG, « Sensorless Scalar-Controlled Induction Motor Drives With Modified Flux Observer », IEEE transactions on energy conversion, vol.18, no. 2, june 2003.
- [61] J.P. LOUIS, « Modèles pour la commande des actionneurs électriques », édition Lavoisier, Paris 2004.
- [62] A. M. TRZYNADLOWSKI, « Control of induction motors », University of Nevada, Reno, édition academic press, London 2001.
- [63] M. POLOUJADOFF, « Machine asynchrone, Régime permanent », Technique d'ingénieur, D3 480.
- [64] E. FENNOUH, « Apport des onduleurs multi-niveaux dans la commande de la machine asynchrone (moteur à induction) », Thèse de magister, Université de Batna, 2012.
- [65] M. DESSOUDE, « Moteurs asynchrones : Choix et problèmes connexes », Techniques de l'Ingénieur, D 3 490.
- [66] J.P. CARON, J.P. HAUTIER, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », édition Technip, Paris 1995.